

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**EFEITO DA TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Lucas Eduardo Grave

Lajeado, junho de 2016

Lucas Eduardo Grave

## **EFEITO DA TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Lajeado, junho de 2016

Lucas Eduardo Grave

## **EFEITO DA TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos –  
orientador  
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Ma. Carolina Becker Pôrto Fransozi  
Centro Universitário UNIVATES

Eng<sup>a</sup> Civil Gabriela Lehnem  
Compasul Construção e Serviços Ltda.

Lajeado, junho de 2016

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me deu saúde, energia e condições para concluir este trabalho.

Agradeço aos meus pais, Gertrudes e Günther, que me proporcionaram desde pequeno um bom estudo.

Agradeço a minha esposa, Pauline, por todo o apoio, incentivo, paciência e amor durante toda essa caminhada.

Ao meu professor orientador, Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos, pelo suporte, dedicação, conhecimento e disposição em me auxiliar.

E por fim, aos meus colegas, pela parceria durante todos esses anos de graduação.

## RESUMO

O estudo apresenta características da influência da temperatura de compactação de misturas asfálticas em relação ao seu desempenho, simulando a aplicação destas em obras de pavimentação fora da sua temperatura ideal. O estudo contemplou a criação de um projeto de mistura asfáltica específico para o CAP 50/70, com objetivo de comparar resultados de propriedades volumétricas e mecânicas da mistura asfáltica Flexpave 55/75, do estudo de Lehnen (2015). A moldagem e a compactação dos corpos de prova foram em temperaturas de 100°C, 130°C e 160°C, aplicando uma energia de compactação de 75 golpes por face. Para a obtenção dos resultados, realizou-se a determinação das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas, além da análise da relação da vida útil do pavimento com as diferentes temperaturas de compactação. As propriedades volumétricas foram encontradas através da obtenção da densidade aparente, do grau de compactação e do volume de vazios. Já as propriedades mecânicas foram obtidas com os ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência. Por fim, utilizou-se o programa SisPav para a verificação do comportamento de um determinado pavimento, possibilitando a análise da influência da temperatura de compactação na duração da sua vida útil. Os resultados permitiram concluir que as propriedades volumétricas e mecânicas das duas misturas estão diretamente ligadas à temperatura de compactação das mesmas, isto porque a elevação da temperatura proporciona uma melhor compactação da mistura, aumentando sua densidade, grau de compactação e assim, reduzindo o seu volume de vazios. Além disso, o aumento da temperatura resulta em uma maior resistência à tração e um maior módulo de resiliência da mistura asfáltica. Em um comparativo entre as duas misturas asfálticas pode-se afirmar que a mistura Flexpave 55/75 apresenta uma variação muito maior em suas propriedades, quando compactada em diferentes temperaturas, que a mistura CAP 50/70, muito mais homogênea.

**Palavras-chave:** Misturas asfálticas. Temperatura. Compactação. Pavimento.

## **ABSTRACT**

The study presents features of the influence of the temperature of compaction of asphalt mixtures in relation to their performance, simulating the application of these in paving works out of their ideal temperature. The study included the creation of a project of an asphalt mixture specific to the CAP 50/70, which aimed to compare results of volumetric and mechanical properties of the Flexpave 55/75 asphalt mixture, of Lehnen's study (2015). The modeling and the compaction of the proof bodies were in temperatures of 100oC, 130oC and 160oC, applying a compaction energy of 75 blows per face. To obtain the results, the volumetric and mechanical properties of the asphalt mixtures were determined, as well as the analysis of the relation of the lifespan of the paving with the different compaction temperatures. The volumetric properties were found by obtaining the density, the degree of compaction and the void volume. The mechanical properties were obtained by tests of resistance to traction and modulus of resilience. Finally, the SisPav program was used to verify the behavior of a specific pavement, enabling the analysis of the influence of the temperature of compaction in the duration of its lifespan. The results led to the conclusion that the volumetric and mechanical properties of both mixtures are directly linked to the temperature of compaction of both of them, because the elevation of the temperature provides a better compaction of the mixture, increasing its density, degree of compaction and therefore, reducing its void volume. Besides, the increase of the temperature results in a higher resistance to traction and a bigger resilient modulus of the asphalt mixture. Comparing the two asphalt mixtures it is possible to claim that the Flexpave 55/75 mixture presents a much bigger variation in its properties, when compacted in different temperatures, then the mixture 50/70, much more homogeneous.

**Keywords:** Asphalt mixtures. Temperature. Compaction. Pavement.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de pavimento-tipo.....	20
Figura 2 – Distribuição de cargas em pavimentos rígidos e flexíveis.....	21
Figura 3 – Esforços em camadas do pavimento.....	22
Figura 4 – Camadas genéricas de um pavimento.....	23
Figura 5 – Classificação de revestimentos.....	24
Figura 6 – Classificação de bases e sub-bases.....	25
Figura 7 – Polímero utilizado em misturas asfálticas.....	32
Figura 8 – Distribuição granulométrica.....	35
Figura 9 – Localização da pedreira.....	44
Figura 10 – Britas.....	44
Figura 11 – Menu principal do programa SisPav.....	48
Figura 12 – Tela de entrada de dados de caracterização da estrutura (SisPav).....	49
Figura 13 – Tela de entrada de dados de caracterização do tráfego (SisPav).....	49
Figura 14 – Tela clima do programa SisPav.....	50
Figura 15 – Tela modelos do SisPav.....	51
Figura 16 – Tela opções do SisPav.....	52
Figura 17 – Aba resultados do programa sisPav.....	52
Figura 18 – Separação dos agregados.....	55
Figura 19 – Estufa.....	55
Figura 20 – Separação granulométrica dos agregados.....	56
Figura 21 – Aquecimento dos agregados.....	57
Figura 22 – Aquecimento do ligante.....	57
Figura 23 – Adição do ligante asfáltico.....	58
Figura 24 – Aspecto final da mistura.....	58

Figura 25 – Compactação da mistura.....	60
Figura 26 – Corpos de prova em repouso.....	61
Figura 27 – Pesagem dos corpos de prova.....	62
Figura 28 – Ensaio de estabilidade e fluência.....	63
Figura 29 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico.....	72
Figura 30 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico.....	73
Figura 31 - Ensaio de módulo de resiliência.....	74

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Representação convencional das curvas granulométricas.....	36
Gráfico 2 – Grau de compactação x Temperatura .....	39
Gráfico 3 – Volume de vazios x Temperatura.....	40
Gráfico 4 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70.....	40
Gráfico 5 – Gráfico estabilidade x fluência.....	62
Gráfico 6 – Teor de asfalto x Volume de vazios.....	76
Gráfico 7 - Densidade x Temperatura – DNIT.....	79
Gráfico 8 - Densidade x Temperatura – ASTM.....	80
Gráfico 9 - Grau de compactação x Temperatura – DNIT.....	82
Gráfico 10 - Grau de compactação x Temperatura – ASTM.....	83
Gráfico 11 - Volume de vazios x Temperatura – DNIT.....	84
Gráfico 12 - Volume de vazios x Temperatura – ASTM.....	85
Gráfico 13 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70.....	86
Gráfico 14 - Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75.....	87
Gráfico 15 – Resistência à tração x Temperatura.....	89
Gráfico 16 – Módulo de Resiliência x Temperatura.....	91
Gráfico 17 – MR / MT x Temperatura.....	92
Gráfico 18 – Deflexão x Temperatura.....	93
Gráfico 19 – Tensão de tração x Temperatura.....	95
Gráfico 20 – Deformação de tração x Temperatura.....	96



Gráfico 21 – Vida Útil x Temperatura.....	97
---	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Granulometria e percentual de ligante asfáltico em relação as faixa de mistura.....	27
Quadro 2 – Valores limites para características das misturas.....	28
Quadro 3 – Características dos diversos tipos de CAP.....	30
Quadro 4 – Características dos diversos tipos de AMP.....	33
Quadro 5 – Especificações das Peneiras.....	35
Quadro 6 – Composição da mistura asfáltica.....	42
Quadro 7 – Especificação da mistura asfáltica.....	43
Quadro 8 – Propriedades finais da mistura.....	43
Quadro 9 – Especificações técnicas do CAP 50/70.....	46
Quadro 10 – Temperaturas convencionais de misturas e compactação – Ligantes asfálticos.....	47
Quadro 11 – Composição granulométrica de um corpo de prova.....	54
Quadro 12 – Exemplo da composição dos agregados.....	64
Quadro 13 – Exemplos de curvas dos parâmetros determinados na dosagem Marshall.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades finais da mistura.....	77
Tabela 2 – Densidade aparente – DNIT .....	79
Tabela 3 – Densidade x Temperatura – ASTM .....	80
Tabela 4 – Grau de compactação x Temperatura – DNIT.....	81
Tabela 5 – Grau de compactação x Temperatura – ASTM .....	82
Tabela 6 – Volume de vazios x Temperatura – DNIT .....	84
Tabela 7 – Volume de vazios x Temperatura - ASTM.....	85
Tabela 8 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70.....	86
Tabela 9 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75.....	87
Tabela 10 – Resistência à tração x Temperatura.....	89
Tabela 11 – Módulo de Resiliência x Temperatura.....	90
Tabela 12 – MR / MT x Temperatura.....	92
Tabela 13 – Deflexão x Temperatura.....	93
Tabela 14 – Tensão de tração x Temperatura.....	94
Tabela 15 – Deformação de tração x Temperatura.....	95
Tabela 16 – Vida Útil x Temperatura.....	97

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ADP - Asfalto Diluído de Petróleo  
AMB - Asfalto Modificado por Borracha  
AMP - Asfalto Modificado por Polímero  
ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
AR - Agente Rejuvenescedor  
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo  
CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado à Quente  
cm - centímetro  
cm<sup>2</sup> - centímetro quadrado  
CNT - Confederação Nacional do Transporte  
d - densidade aparente  
D - diâmetro  
DMT - densidade máxima teórica  
DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem  
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
EAP - Emulsão Asfáltica de Petróleo  
G - densidade real  
Gc - grau de compactação  
Gmb - densidade relativa aparente  
Gmm - densidade máxima  
H - altura  
kgf - quilograma-força

LAPAV - Laboratório de Pavimentação

m<sup>3</sup> - metro cúbico

MPa - mega pascal

MR - módulo de resiliência

P - peso do material constituinte

N - newton

RT - resistência à tração

SSF - Saybolt-Furol

t - tonelada

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Vv - volume de vazios

°C - graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivos gerais .....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
1.2 Estrutura do trabalho.....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1 Introdução.....	18
2.2 O que é um pavimento.....	18
2.3 Camadas de um pavimento.....	19
2.4 Caracterização de pavimento.....	20
2.5 Estrutura do pavimento flexível.....	22
2.6 Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).....	26
2.6.1 Ligantes.....	28
2.6.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP).....	29
2.6.1.2 Asfalto modificado por polímero (AMP).....	30
2.6.2 Agregados.....	33
2.7 Efeito da temperatura e do grau de compactação nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica.....	36
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>41</b>
3.1 Introdução.....	41
3.2 Materiais.....	42
3.2.1 Projeto da mistura asfáltica.....	42
3.2.2 Agregados.....	44
3.2.3 Origem dos ligantes.....	45
3.2.4 Programa SisPav.....	47
3.3 Método.....	53
3.3.1 Introdução.....	53
3.3.2 Preparo dos agregados.....	53
3.3.3 Ensaio Marshall.....	62
3.3.3.1 Considerações finais sobre a dosagem Marshall.....	66
3.3.4 Determinação da densidade aparente.....	68
3.3.5 Determinação do índice de vazios.....	69
3.3.6 Determinação do grau de compactação.....	70
3.3.7 Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	71
3.3.8 Determinação do módulo de resiliência.....	73

<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
4.1 Determinação do teor de projeto.....	76
4.2 Propriedades finais da mistura.....	77
4.3 Moldagem em diferentes temperaturas.....	77
4.4 Resultados Volumétricos.....	78
4.5 Resultados Mecânicos.....	88
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>
Anexo I – Projeto de mistura asfáltica Flexpave 55/75.....	106
Anexo II – Projeto da mistura asfáltica CAP 50/70.....	113

## 1 INTRODUÇÃO

O grande aumento da pavimentação asfáltica foi causado pelas solicitações do tráfego de veículos sobre a superfície das estradas rurais pavimentadas com macadame hidráulico. A passagem dos veículos e a ação do clima geravam problemas de erosão e de estabilidade estrutural do pavimento, prejudicando a qualidade de rolamento.

O aumento do número de automóveis, a partir de 1920, exigiu o desenvolvimento de revestimentos asfálticos mais resistentes e duráveis. Até aquela época, não eram realizados ensaios de resistência para a avaliação das misturas.

Hoje, o modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil. Para Bernucci (2008), apenas 12% da malha rodoviária nacional é pavimentada, e desta parcela aproximadamente 95% é composta por revestimento asfáltico. A predominância desta utilização, de modo que pavimentos asfálticos antigos continuem sendo restaurado deve-se não só pelo baixo custo na sua execução se comparado a outros tipos de revestimento, mas também pela facilidade e disponibilidade de usinas asfálticas ligada ao domínio das técnicas construtivas.

Existe atualmente uma grande demanda na construção de novas vias de acesso, bem como na necessidade de pavimentação, duplicação e restauração das vias existentes. Com este objetivo de alongar a vida útil das vias, Balbo (2007) sugere que deve-se "tornar o material mais rígido ao receber esforços (sofrendo menores deformações) e mais mole ao aliviar os mesmos esforços (apresentando maior recuperação elástica)". Seguindo nessa linha, a adição de polímero no ligante asfáltico aumenta sua excelência. Os asfaltos modificados por polímero necessitam

de um rigoroso controle de qualidade, uma vez que as temperaturas de usinagem e aplicação deste divergem das adotadas para asfaltos convencionais.

Ceratti et al (2007) explica que as temperaturas de usinagem e de compactação da mistura asfáltica devem respeitar aquelas determinadas anteriormente em projeto. A temperatura não pode estar nem abaixo nem acima da estabelecida em projeto, uma vez que esta alteração implica diretamente nas demais características da mistura, como por exemplo, a viscosidade.

Na prática, é mais frequente a ocorrência da massa asfáltica chegar na obra a uma temperatura abaixo da correta, do que acima. Isto ocorre porque algumas situações favorecem este acontecimento, como locais com baixa temperatura, distâncias elevadas das usinas até a obra, etc. Tudo isto faz com que a mistura asfáltica seja submetida a um maior período de resfriamento.

Birman *apud* Ceratti et al (2007) afirma que a densidade aparente da mistura asfáltica é influenciada principalmente pela temperatura desta. Para ele, a grande maioria dos problemas causados durante a execução dos pavimentos seriam solucionados se fosse possível fazer com que as misturas asfálticas fossem todas compactadas dentro dos limites de temperaturas estabelecidos no seu projeto.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos gerais**

Avaliar o comportamento das misturas asfálticas convencionais e com adição de polímero quando submetidas a diferentes temperaturas de compactação, analisando o impacto sobre a vida útil do pavimento.



### **1.1.2 Objetivos específicos**

Simular, através da compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas, a aplicação destas em obras de pavimentação fora do intervalo de temperatura estabelecido em projeto. O estudo dará continuidade ao trabalho realizado por Gabriela Lehnem (2015), o qual utilizou projeto de mistura asfáltica específico para Flexpave 55/75 e moldou CPs em Flexpave 55/75 e CAP 50/70. O presente trabalho criará um projeto específico para a mistura asfáltica CAP 50/70, e assim, fará a comparação com os resultados encontrados por Lehnem (2015).

Para tanto, serão determinados em laboratório as seguintes propriedades das misturas asfálticas moldadas:

- Densidade aparente;
- Volume de vazios;
- Grau de compactação;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Módulo de resiliência.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos, os quais estão descritos abaixo:

O Capítulo 1 introduz o tema da monografia, fazendo uma breve análise sobre a atual situação da malha rodoviária brasileira, a utilização de técnicas que melhoram o desempenho dos pavimentos e também apresentando os objetivos e a estrutura do referido trabalho.

O Capítulo 2 contempla o referencial teórico utilizado como embasamento para a formulação do estudo, abrangendo a caracterização e estrutura dos pavimentos, características de ligantes e agregados, dentre outros temas pertinentes à pesquisa.

O Capítulo 3 expõe o procedimento utilizado no método de pesquisa do estudo, contemplando as especificações dos materiais utilizados e dos ensaios das misturas asfálticas.

O Capítulo 4 consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos, iniciando pela apresentação dos resultados volumétricos das misturas asfálticas, seguidos dos resultados mecânicos e por fim a aplicação no programa Sispav.

O Capítulo 5 refere-se às conclusões obtidas através dos resultados encontrados.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Introdução**

Em geral, a péssima qualidade das estradas brasileiras fundamenta cada vez mais o aprofundamento nos estudos sobre aumento da resistência e durabilidade dos pavimentos. Com este propósito, o presente estudo busca em seu referencial teórico, apresentar os principais conceitos utilizados que envolvem a pesquisa, assim como o desenvolvimento de ideias partindo de estudos que embasam o tema desenvolvido.

### **2.2 O que é pavimento**

Segundo Bernucci et al. (2006) pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Já Balbo (2007) afirma que o pavimento é uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo.

Por fim, Danielecki (2004) citando a atual Norma Brasileira de Pavimentação, NBR 72/1982, define pavimento como:

[...] uma estrutura construída após terraplanagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a: a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; b) melhorar as condições de rolamento quanto à

comodidade e segurança; c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

Para Pinto (2010) o usuário de uma rodovia conceitua o pavimento como uma estrutura capaz de suportar o tráfego, proporcionando-lhe conforto e segurança. Porém, do ponto de vista técnico, o pavimento é uma estrutura de uma ou mais camadas, que tem por finalidade suportar e distribuir as cargas aplicadas em sua superfície, de modo que as tensões resultantes permaneçam abaixo das tensões admissíveis pelos materiais que o compõe.

### 2.3 Camadas de um pavimento

A estrutura do pavimento é compreendida, em seu sentido estrutural, para receber e transmitir os esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores. De acordo com Balbo (2007), cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos, em qualquer ação climática, condições adequadas de rolamento e suporte.

A NBR 7207/82 assegura que o pavimento é constituído por quatro camadas: subleito, sub-base, base e revestimento, cujas definições são:

□ **Subleito** é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento. Quando necessário, faz-se um reforço do subleito;

□ **Sub-base** é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido na terraplenagem. Os materiais que podem ser empregados como sub-base são o cascalho, solo-cal, solo-cimento (SILVA, 2008);

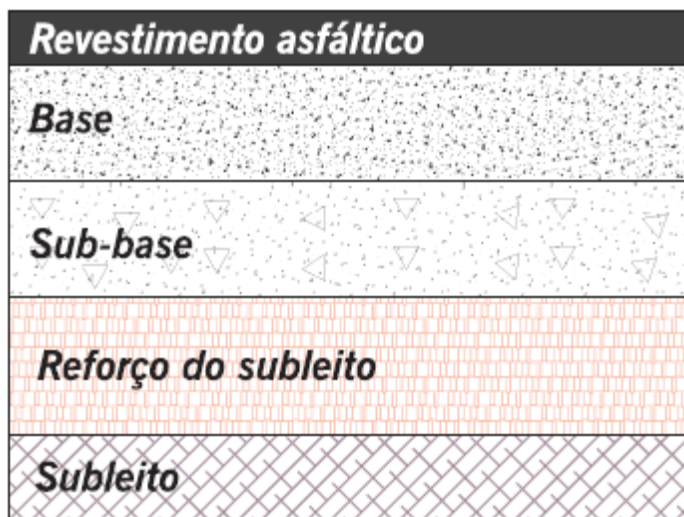
□ **Base** é a camada que tem por função aliviar a tensão nas camadas inferiores, permitir a drenagem das águas que se infiltram no pavimento (por meio de drenos) e resistir às tensões e deformações atuantes. A tensão máxima de cisalhamento ocorre na base, logo ela deverá ser constituída de material de

excelente qualidade e ser muito bem construída. Conforme Silva (2008), os materiais que podem ser empregados como base são: brita graduada simples (BGS), concreto compactado a rolo (CCR), brita graduada tratada com cimento (BGTC), macadames hidráulico e seco, solo-cal, solo-cimento e solo-brita;

□ **Revestimento** é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, destinada econômica e simultaneamente a melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; e resistir aos esforços que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento. Bernucci et al.(2006) acrescentam que “ [...] essa camada deve ser tanto quanto impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos.”

A Figura 1 mostra uma estrutura-tipo de pavimento, com as camadas anteriormente descritas.

Figura 1 – Estrutura de pavimento-tipo



Fonte: Bernucci et al.(2006).

## 2.4 Caracterização de pavimento

Pinto (2010) classifica os pavimentos em três categorias:

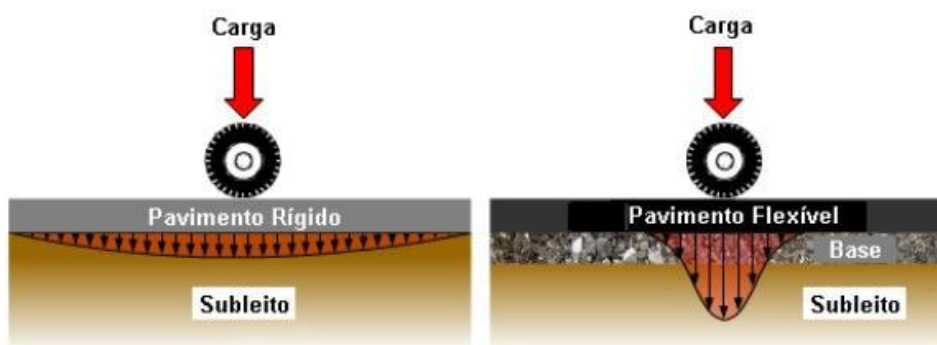
**Rígido:** É o pavimento que possui camada de revestimento com elevada rigidez se comparado às camadas subjacentes, absorvendo a grande maioria das tensões nele aplicadas. São estes os pavimentos construídos com placas de concreto de cimento Portland.

**Flexível:** É o pavimento em que todas as camadas sofrem deformação elástica ao serem submetidas a carregamentos. Com isto, a carga se distribui em proporções equivalentes ao longo da estrutura. Este pavimento constitui-se de revestimento asfáltico sobre base granular.

**Semirrígido:** É o pavimento composto por base de material cimentício, coberto por revestimento asfáltico.

Já Bernucci et al (2008) destaca os pavimentos rígidos e os pavimentos flexíveis como os principais tipos existentes. A distribuição de cargas nestes dois tipos de pavimento está ilustrada abaixo na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição de cargas em pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: Departamento de Transportes da UFPR (2009)

Como é possível visualizar, o pavimento rígido é capaz de absorver e distribuir as tensões, funcionando como camada de rolamento e também estrutura, diminuindo e minimizando a tensão transferida à fundação. Já o pavimento flexível, não absorve os carregamentos da mesma forma, sendo a fundação responsável por recebê-los. (BIANCHI ET AL 2008)

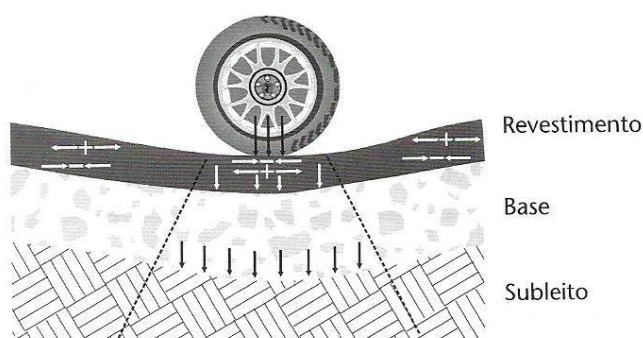
## 2.5 Estrutura do pavimento flexível

Balbo (2007) explica que o funcionamento adequado de um pavimento ocorre quando toda a sua estrutura sofre deformações compatíveis com a natureza de cada material que a compõe. Isto é fundamental para que não ocorram rupturas e danificações precoces no pavimento, pois assim as tensões são transmitidas à fundação de forma suave e regular, evitando a ocorrência de estados de tensão superiores aos projetados.

Para o autor, cada camada que compõe a estrutura de um pavimento possui uma ou mais funções específicas. O resultado da aplicação de uma carga na superfície do pavimento dependerá muito do comportamento mecânico isolado e simultâneo de todas as camadas da estrutura.

Bernucci et al (2008) acrescenta que além da interação entre as diferentes camadas do pavimento, o comportamento da estrutura depende também da espessura destas camadas bem como a rigidez de cada uma. A Figura 3 ilustra o comportamento das camadas da estrutura de um pavimento quando submetidas às tensões provenientes do tráfego.

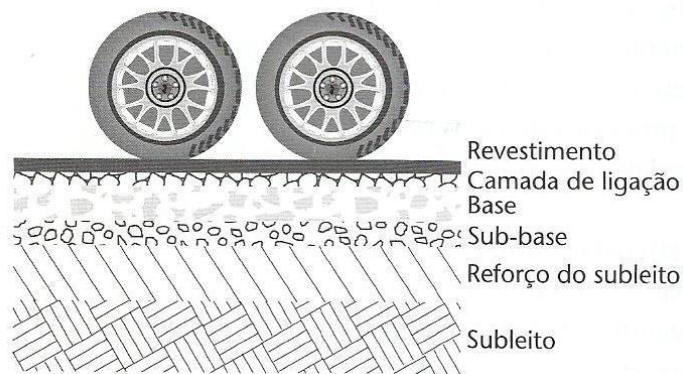
Figura 3 - Esforços em camadas do pavimento



Fonte: Balbo (2007, p. 35)

A Figura 4 aponta as diversas camadas que podem compor a estrutura de um pavimento flexível. São elas: revestimento, camada de ligação, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, as quais serão descritas a seguir.

Figura 4 – Camadas genéricas de um pavimento



Fonte: Balbo (2007, p. 36)

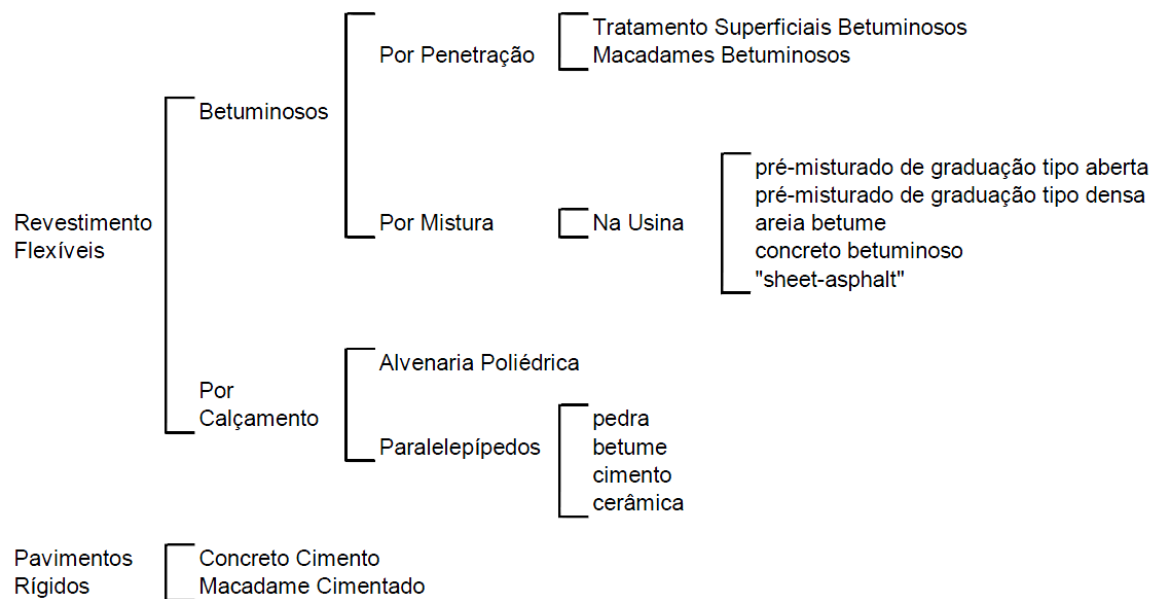
A escolha pelo tipo de revestimento a ser utilizado está condicionada a inúmeros fatores, como a localidade na qual o pavimento será executado, as características climáticas e a disponibilidade de materiais e recursos na região. Porém, no país, incide na grande maioria das obras o revestimento asfáltico conhecido como CBUQ - Concreto betuminoso usinado a quente. A composição do revestimento asfáltico, feita através da mistura de agregados e ligante asfáltico, deve ser suficientemente adequada a fim de que "garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local". (BERNUCCI et al, 2008, p. 157)

Balbo (2007) explica que "camada de ligação" e "camada de rolamento" são expressões utilizadas para classificar a subdivisão do revestimento asfáltico em mais de uma camada. Essa subdivisão ocorre não só por questões técnicas, mas também visando a redução de custos na execução de uma obra de pavimentação. A "camada de ligação", conhecida como binder, é uma camada intermediária, localizada entre a "camada de rolamento" e a base do pavimento. Por sua vez, a chamada "camada de rolamento" compõe a superfície do pavimento, estando diretamente exposta ao recebimento dos carregamentos provenientes do tráfego. Existe ainda a expressão conhecida como "camada de regularização", a qual é executada sobre superfície antiga e irregular a fim de nivelar o greide.



O Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006) apresenta um esquema representativo do modo como os diversos tipos de revestimento podem ser classificados e agrupados, conforme a Figura 5. Em virtude do presente estudo referir-se apenas às misturas asfálticas betuminosas quentes em pavimentos flexíveis, os demais tipos de revestimento não serão abordados.

Figura 5 - Classificação de revestimentos



Fonte: DNIT (2006a, p. 98)

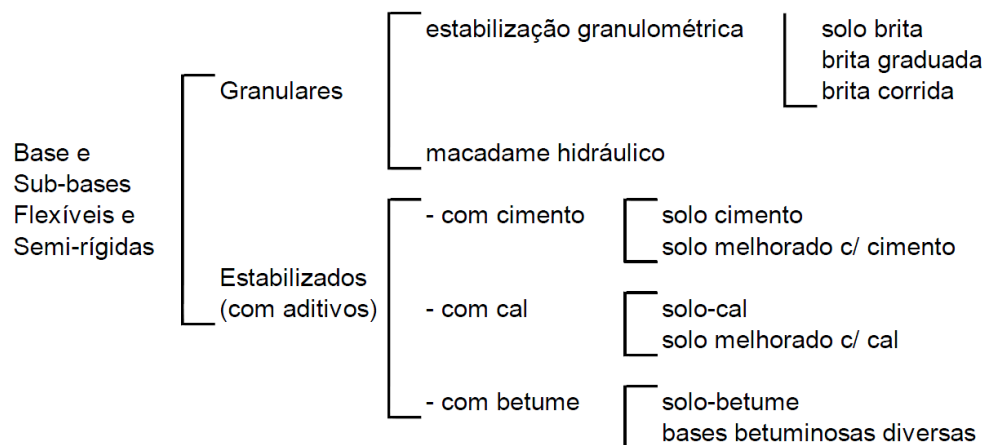
A camada de base, abaixo do revestimento, pode sobrepor a camada de sub-base ou estar diretamente sobre o subleito. Para Pinto (2010), a principal função desta camada é a absorção e consequente redução e distribuição das tensões de compressão nas camadas subjacentes à base, promovendo a resistência e a minimização de deformações na estrutura. Utiliza-se normalmente materiais britados para execução desta camada.

Bernucci et al (2008) explica que a ausência de uma ou mais camadas na estrutura de um pavimento pode ocorrer devido às características dos materiais nele empregados e do volume de tráfego.

A camada de sub-base está localizada entre a base e o subleito, estando sempre presente em estruturas de pavimentos que estejam submetidos à tráfego intenso e que não possuam subleito de excelente qualidade. (PINTO, 2010)

Ainda segundo o autor, esta camada difere-se da camada de base, por absorver as tensões em proporções menores e por ser constituída de materiais que diferem na granulometria. Assim como a sua camada adjacente, a sub-base é executada com materiais britados. Para a classificação e agrupamentos dos diversos tipos existentes de bases e sub-bases, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) contém um esquema representativo, apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Classificação de bases e sub-bases



Fonte: DNIT (2006a, p. 96)

O reforço de subleito é constituído por material argiloso. Sua utilização dá-se sempre que o solo natural do leito que abrigará o pavimento não possuir resistência suficiente para suportar as tensões oriundas do tráfego. Para Balbo (2007), o aumento da espessura das camadas adjacentes poderia suprimir a utilização do reforço de subleito, porém, esta camada apresenta-se como uma solução economicamente mais viável.

Como camada mais inferior, o subleito constitui-se de material natural estável e compacto, executado sob forma de corte ou aterro ainda na fase de terraplenagem. O subleito assume grande importância, uma vez que, estando em

más condições, compromete todo o pavimento. Para a execução das camadas adjacentes, é necessária a regularização do subleito, proporcionando uma superfície regular transversalmente e longitudinalmente. A regularização em leitos antigos pode ocorrer através de pequenos aterros, "permanecendo intacta a compactação já executada pelo tráfego por vários anos" (PINTO, 2010, p. 8)

## **2.6 Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)**

Segundo Balbo (2007), é considerado o mais comum e tradicional entre os tipos de revestimento asfáltico utilizados no país. O CBUQ nada mais é do que mistura homogeneizada de agregados minerais e de ligante asfáltico, fabricada a quente em usina misturadora.

A especificação DNIT 031 (2006), define o CBUQ como "mistura executada a quente, com características específicas, composta de agregado graúdo, material de enchimento (filer) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente".

Como ligante é utilizado o cimento asfáltico de petróleo (CAP), normalmente o CAP 50/70. O agregado graúdo pode ser pedra britada, escória ou seixo rolado, enquanto o agregado miúdo pode ser areia ou pó de pedra. Além destes, outros materiais que respeitem as normas regentes podem ser empregados, adaptando-se às necessidades de cada projeto.

No Brasil, normalmente adota-se as especificações do DNIT para embasamentos técnicos e normatização dos serviços, devido ao seu cunho nacional. A especificação classifica ainda as faixas de mistura em A, B ou C quanto à sua granulometria e percentual de ligante asfáltico utilizado, conforme pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 - Granulometria e percentual de ligante asfáltico em relação às faixas de mistura

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série	Abertura	A	B	C	Tolerâncias
ASTM	(mm)				
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½ "	38,1	95 – 100	100	-	+ - 7%
1"	25,4	75 – 100	95 – 100	-	+ - 7%
¾ "	19,1	60 – 90	80 – 100	100	+ - 7%
½ "	12,7	-	-	80 – 100	+ - 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 – 80	70 – 90	+ - 7%
Nº 4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 – 72	+ - 5%
Nº 10	2,0	20 – 40	20 – 45	22 – 50	+ - 5%
Nº 40	0,42	10 – 30	10 – 32	8 – 26	+ - 5%
Nº 80	0,18	5 – 20	8 – 20	4 – 16	+ - 3%
Nº 200	0,075	1 – 8	3 - 8	2 - 10	+ - 2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0 – 7,0 Camada de ligação (Blinder)	4,5 – 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 – 9,0 Camada de rolamento	+ - 0,3%

Fonte: DNIT (2006b, p. 5)

Também devem ser respeitados os limites de resistência à tração e percentual de vazios de mistura, conforme indicação do Quadro 2.

Quadro 2 – Valores limites para características das misturas

<b>Características</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Camada de rolamento</b>	<b>Camada de ligação (Blinder)</b>
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação Betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima. (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 183	0,65	0,65

Fonte: DNIT (2006b, p. 5)

A execução da mistura deve respeitar as condições estabelecidas pela especificação, quanto à temperatura de usinagem. A temperatura do ligante varia de acordo com o material escolhido, uma vez que se determina a temperatura ideal baseando-se na relação temperatura-viscosidade. A faixa adequada é de 75 a 150 SSF "Saybolt-Furol", estando preferencialmente em um intervalo entre 75 a 95 SSF. O ligante não deve ter sua temperatura inferior a 107°C e nem superior a 177°C. O aquecimento dos agregados deve superar a temperatura do ligante em 10°C até 15°C, não podendo ultrapassar o 177°C. (DNIT 031, 2006)

### 2.6.1 Ligantes

De acordo com Bernucci et al (2008), atualmente, o mercado brasileiro dispõe dos seguintes tipos de ligantes asfálticos:

- Cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- Asfaltos diluídos de petróleo – ADP;
- Emulsões asfálticas de petróleo – EAP;
- Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- Asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- Agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

### **2.6.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)**

O CAP é utilizado como ligante na pavimentação por possuir boa aderência aos agregados. É um produto do refinamento do petróleo cru, apresentando coloração negra ou marrom escuro. Muito viscoso, age como ligante na pavimentação, apresentando a temperaturas ambientes, consistência sólida a semissólida, necessária para manter o envolvimento dos agregados. (ASPHALT INSTITUTE apud BALBO, 2007).

De acordo com Balbo (2007), O CAP é composto por hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, além de enxofre, nitrogênio e oxigênio em pequenas quantidades. Os asfaltenos contribuem para a rigidez do CAP, enquanto os maltenos representam a sua parte oleosa, proporcionando plasticidade e viscosidade.

Por possuir caráter termossuscetível, o CAP tem sua consistência alterada quando submetido a diferentes temperaturas. Bernucci et al (2008) explica que o produto é semissólido à baixas temperaturas, visco elástico quando em temperatura ambiente e líquido se aquecido. Porém, se exposto a temperaturas excessivas, pode apresentar patologias. À altas temperaturas sofre oxidação, apresentando-se menos viscoso e quebradiço. Já em temperaturas mais baixas sofre retração térmica, propiciando fissuramentos. (BALBO, 2007)

Sua classificação, de acordo com DNIT 095 (2006), é relacionada à sua penetração, podendo ser: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. Segundo Bernucci et al (2008), "a penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C". O resultado final obtém-se da média de três ensaios de penetração, quando a diferença entre eles estiver dentro do estipulado pela norma regente.

As características dos tipos de CAP estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Características dos diversos tipos de CAP

Características	Unidades	Limites				Métodos	
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín		90	50	43	36		
a 170°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín		203	112	97	81		
a 170°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de suscetibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulger, mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em trocloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25°C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Variação em massa, máx	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Bernucci et al (2008, p. 61)

### 2.6.1.2 Asfalto modificado por polímero (AMP)

Para Bernucci et al (2008), os polímeros tem como principal objetivo melhorar o desempenho dos ligantes asfálticos, aumentando sua resistência. Cada vez mais utilizados, proporcionam melhoria ao tráfego, como conforto e segurança. O uso de asfaltos modificados tem por finalidade também o prolongamento da vida útil de um

pavimento, reduzindo a frequência com que ocorrem as manutenções, sendo comumente utilizados em pontos com maior intensidade de tráfego.

A adição de polímeros ao ligante asfáltico, segundo Brûlé *apud* Balbo (2007) desde o início teve como princípio:

- Elevar a coesão do material;
- Reduzir a suscetibilidade térmica do CAP;
- Baixar a viscosidade à temperatura de aplicação;
- Resultar em CAP com baixa fluência (lenta);
- O CAP apresentar elevada resistência à deformação plástica, à fissuração e à fadiga;
- Garantir uma boa adesividade;
- O CAP ter melhor resistência ao envelhecimento.

Para Bernucci et al (2008), o polímero tem seu comportamento definido por três fatores: materiais de partida, tipo de reação utilizado na sua obtenção e técnica de preparação.

Utilizam-se os seguintes tipos de reação:

- Poliadição. Exemplo: SBR (borracha estireno-butadieno) e EVA (etileno-acetato de vinila);
- Policondensação. Exemplo: ER e PET;
- Modificação química de outro polímero. Exemplo: SBS (estireno-butadieno-estireno).

Quanto a sua propriedade térmica, os polímeros são divididos em:

- Termorrígidos: Resistem a qualquer ação térmica, não se fundindo. Quando aquecidos endurecem de forma irreversível. Exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- Termoplásticos: Aqueles que se fundem, tornando-se maleável sob forma reversível quando aquecidos novamente. Incorporados aos asfaltos à altas temperaturas. Exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;



- Elastômeros: Se aquecidos, se decompõem antes de amolecer. Exemplo: SBR;

- Elastômeros termoplásticos: À medida em que são submetidos ao aumento de temperatura passam do comportamento elástico para o termoplástico, sendo comumente utilizados em misturas asfálticas. Exemplo: SBS e EVA.

A Figura 7 ilustra a aparência do polímero utilizado nas misturas asfálticas, enquanto o Quadro 4 apresenta as propriedades dos diversos tipos de polímeros existentes.

Figura 7 - Polímero utilizado em misturas asfálticas



Fonte: Greca Asfaltos (2014)

Quadro 4 – Características dos diversos tipos de AMP

<b>Tipos</b>					
Grau (Ponto de amolecimento mín./Recuperação elástica a 25°C mín) (°C/%)	Método ABNT	50/65	55/75	60/85	65/90
<b>Ensaaios na amostra virgem</b>					
Penetração 25°C, 5s, 100g, 0,1mm	NBR 6576	45 - 70	45 - 70	40 - 70	40 - 70
Ponto de amolecimento, mín, °C	NBR 6560	50	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 RPM, máx, cP	NBR 15184	1.500	3.000	3.000	3.000
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 RPM, máx, cP	NBR 15184	1.000	2.000	2.000	2.000
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 RPM, máx, cP	NBR 15184	500	1.000	1.000	1.000
Ponto de fulgor, mín, °C	NBR 11341	235	235	235	235
Ensaio de separação de fase, máx, °C	NBR 15166	5	5	5	5
Recuperação elástica a 25°, 20cm, mín, %	NBR 15086	65	75	85	90
Recuperação elástica a 4°, 10cm, mín, %	NBR 15086	anotar	anotar	anotar	anotar
<b>Ensaaios no resíduo após RTFOT</b>					
Variação de massa, máx, %	NBR 15235	1	1	1	1
Aumento do ponto de amolecimento, °C, máx	NBR 6560	6	7	7	7
Redução do ponto de amolecimento, °C, máx	NBR 6560	3	5	5	5
Porcentagem de penetração original, mín	NBR 6576	60	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín	NBR 15086	80	80	80	80

Fonte: Bernucci et al (2008, p. 70)

## 2.6.2 Agregados

Para a execução das camadas constituintes do pavimento asfáltico são utilizados diversos tipos de agregados. Para Bernucci et al (2008) "agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas em seu estado processado". Ainda para o autor, os agregados utilizados para a pavimentação podem ser divididos em três grupos, de acordo com sua natureza, seu tamanho e sua distribuição de grãos.

Quanto à sua natureza, podem ser subdivididos em: natural, artificial e reciclado.

- Natural: Ocorrem através de todas as fontes naturais possíveis, sendo extraídos através de detonações, escavações, dragagens, etc. Como exemplo, pode-se citar: areia, britas, seixos e pedregulhos;
- Artificial: Podem ser tanto resíduos de processos industriais como fabricados para atingir alto desempenho. Escória de alto-forno e argila expandida são citados como exemplo;
- Reciclado: Este tipo de agregado provém de reutilização de materiais. Atualmente, o emprego de reciclagem de pavimentos asfálticos vem ganhando espaço em obras de infraestrutura, assim como a utilização de resíduos gerados pela construção civil.

Quanto ao seu tamanho, DNIT 031 (2006) subdivide-os em: graúdo, miúdo e material de enchimento (fíler).

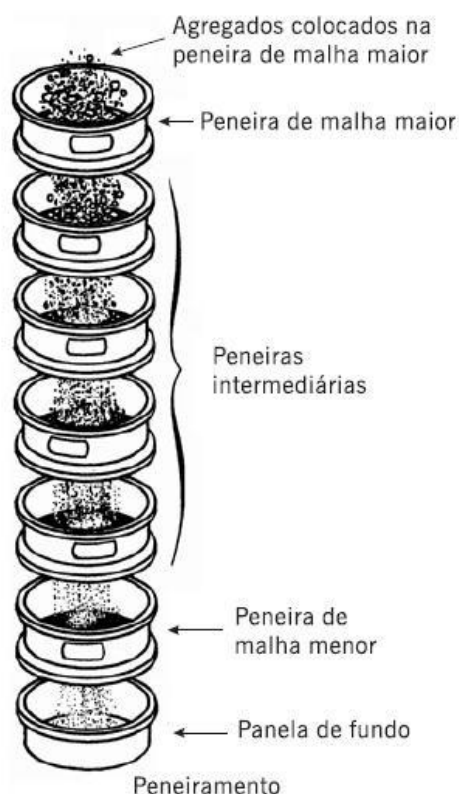
- Graúdo: São os materiais com granulometria superior a 2,0mm. É o caso de britas, seixos e cascalhos;
- Miúdo: São os materiais com granulometria entre 0,075mm e 2,0mm. Areias e pó de pedra são exemplos desde agregado;
- Material de enchimento (fíler): Este material possui pelo menos 65% de suas partículas inferiores a 0,075mm. É representado pela cal hidratada e cimento portland, dentre outros.

Quanto à distribuição de grãos, Bernucci et al (2008, p. 121) explica que:

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc.

A Figura 8 esquematiza a distribuição granulométrica, a qual ocorre através do peneiramento dos agregados, fracionando uma amostra seca, o que resulta em uma percentual de massa retida em cada uma das peneiras calculado sobre a massa total aplicada nestas. O Quadro 5, apresentado na especificação DNER 035 (1995) regulamenta as dimensões de cada peneira.

Figura 8 - Distribuição granulométrica



Fonte: Bernucci et al (2008, p. 121)

Quadro 5 – Especificações das Peneiras

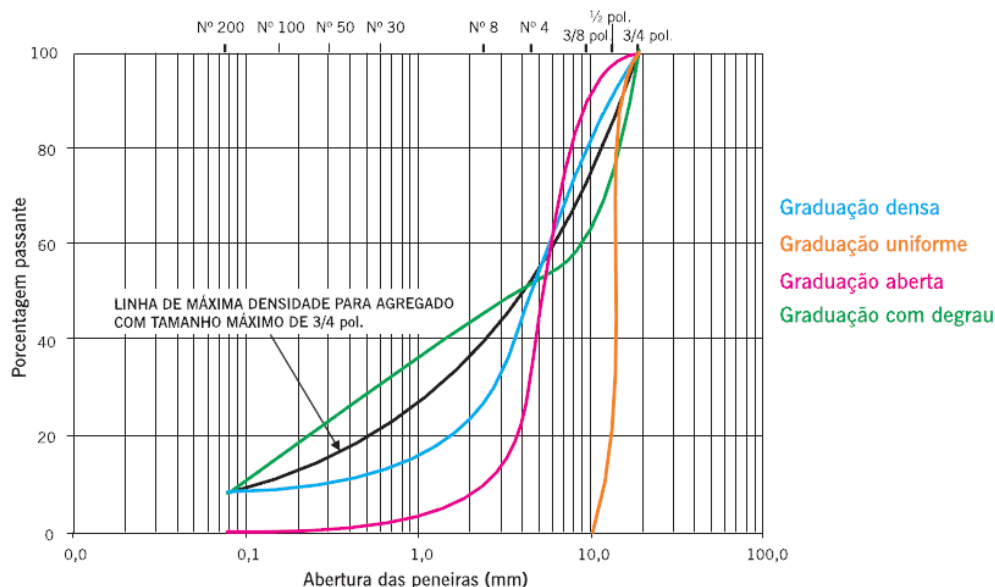
Abertura nominal das malhas		Tolerância da abertura das malhas (mm)			Diâmetro dos fios da tela (μm)		
Principal mm	Peneira nº	Individual máxima (+x)	Média (±y)	Máxima até 6% das malhas (+z)	Mínimo d <sub>min</sub>	Recomendado	Máximo d <sub>max</sub>
75,00		3,09	2,22	2,65	5,4	6,3	7,2
50,00		2,29	1,49	1,89	4,3	5	5,8
37,5		1,85	1,13	1,49	3,8	4,5	5,2
25,00		1,38	0,76	1,07	3	3,55	4,1
19,0		1,13	0,58	0,83	2,7	3,15	3,6
9,5		0,68	0,30	0,49	1,9	2,24	2,6
4,75	4	0,41	0,15	0,28	1,3	1,6	1,9
2,36	8	0,25	0,08	0,17	0,85	1	1,15
2,00	10	0,23	0,07	0,15	0,77	0,9	1,04
1,18	16	0,16	0,04	0,10	0,54	0,63	0,72
0,600	30	0,101	0,021	0,061	0,340	0,400	0,460
0,425	40	0,081	0,016	0,048	0,240	0,280	0,320
0,300	50	0,065	0,012	0,038	0,170	0,200	0,230
0,150	100	0,043	0,006	0,025	0,085	0,100	0,115
0,075	200	0,029	0,004	0,017	0,043	0,050	0,058

Fonte: DNER (1995, p. 6)

Bernucci et al (2008) destaca quatro principais graduações de agregados, as quais tem suas curvas representadas pelo Gráfico 1:

- Graduação densa: Apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima a densidade máxima;
- Graduação aberta: Apresenta distribuição contínua porém, com vazios mal preenchidos;
- Graduação uniforme: A maioria das suas partículas apresenta tamanhos semelhantes;
- Graduação com degrau: Possui uma faixa de agregados intermediários, suscetíveis a segregação.

Gráfico 1 - Representação convencional das curvas granulométricas



Fonte: Bernucci et al (2008, p. 123)

## 2.7 Efeito da temperatura e do grau de compactação nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica

A compactação é uma etapa crucial da construção de qualquer camada de um pavimento. Nas camadas asfálticas, a compactação em campo tem por finalidade aumentar a densidade da massa asfáltica fazendo com que ela alcance os valores previstos no projeto e ofereça uma superfície de rolamento suave ao usuário. A importância da compactação no desempenho dos pavimentos deve-se a

três fatores (Asphalt Institute, 1989): (1) aumento do contato entre agregados promovendo maior fricção interna e resultando em uma mistura com maior estabilidade; (2) diminuição do volume de vazios ( $V_v$ ), que produz um pavimento quase impermeável, reduzindo a penetração da água e do ar, resultando em maior resistência ao envelhecimento por oxidação e maior proteção da base; (3) em pavimentos pouco compactados, que apresentam muitos vazios, haverá maior pós-compactação devido ao tráfego, que ocorrerá principalmente nas trilhas de roda resultando em deformação permanente.

A eficiência da compactação de misturas asfálticas em campo depende de diversas variáveis, como suporte da base, temperatura do ar, umidade ambiente, nível de radiação solar, espessura da camada asfáltica e a temperatura inicial da mistura no momento da compactação (Roberts et al., 1996). A temperatura da mistura tem grande importância, pois a resistência à compactação é um efeito combinado do agregado e do ligante. De maneira geral, quanto mais viscoso estiver o ligante no momento da compactação maior será a resistência oferecida à compactação.

No processo construtivo de um revestimento asfáltico nem sempre as recomendações das normas são seguidas rigidamente. Por vezes a mistura asfáltica fica dentro do caminhão, sendo o tempo de espera para espalhamento e compactação suficiente para que a sua temperatura se reduza a valores abaixo do intervalo estipulado em norma. Deste modo, a compactação empregada pode não ser suficiente para levar a densidade exigida em projeto. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem no Brasil (DNER) recomenda que a temperatura ideal para a compactação é a temperatura na qual o asfalto apresenta viscosidade entre 75 e 150 segundos "Saybolt-Furol" (SSF), de preferência entre os limites de 85 a 95 SSF (DNER, 1994). Portanto, é de grande importância que a mistura asfáltica seja compactada dentro da faixa de temperatura adequada para que a compactação seja mais eficiente.

DeSombre et al. (1998) realizaram pesquisa com o objetivo de definir limites ótimos de temperatura de compactação de diferentes misturas asfálticas. Foram

compactadas misturas asfálticas produzidas com duas granulometrias e três tipos de asfalto, CAP 85/100, CAP 120/150 e AC20. Os resultados indicaram a existência de uma faixa ótima de temperatura de compactação na qual o esforço necessário para compactar a massa é menor.

De acordo com os referidos autores, em temperaturas mais altas o asfalto está pouco viscoso e acontece um aumento da resistência à compactação devido ao maior contato grão a grão. Para temperaturas mais baixas o asfalto está muito viscoso tornando a massa coesa e aumentando a resistência à tensão cisalhante exercida pelo compactador giratório. Os autores concluíram que a temperatura ótima para compactação é aquela na qual a mistura oferece menor resistência à tensão cisalhante quando compactada no compactador giratório. Foi considerado que a faixa de temperatura recomendada para compactar as misturas analisadas estaria entre 15°C a mais e a menos que a temperatura ótima obtida com o uso do compactador giratório.

Apesar da compactação em laboratório pelo método Marshall não ser uma simulação perfeita do que acontece em campo, ela é largamente usada como parâmetro para estimar o Vv na mistura após a consolidação pelo tráfego. Através dela pode-se ter um indicativo da influência do esforço de compactação e da temperatura nas propriedades das misturas asfálticas.

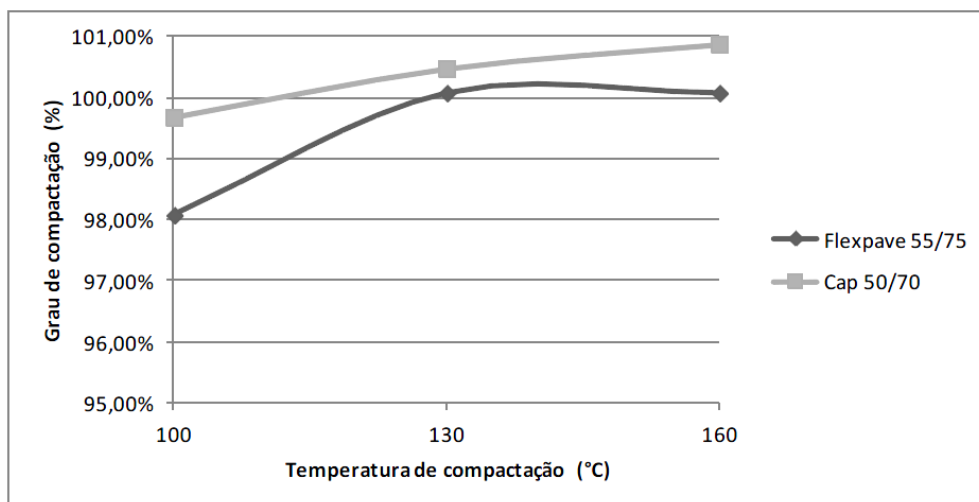
Lehnen (2015) apresenta um estudo sobre a influência da temperatura de compactação de misturas asfálticas em relação ao seu desempenho, simulando a aplicação destas misturas em obras de pavimentação fora da sua temperatura ideal. Através da análise da influência da temperatura, a autora concluiu que as propriedades volumétricas e mecânicas das misturas sofrem incidência direta da temperatura de compactação das mesmas. Isto porque a elevação da temperatura proporciona uma melhor compactação da mistura, aumentando sua densidade, grau de compactação e consequentemente, reduzindo o seu volume de vazios. Além disso, o aumento da temperatura resulta em uma maior resistência à tração e um maior módulo de resiliência da mistura asfáltica. Quanto à vida útil do pavimento, a temperatura de compactação incide diretamente sobre esta, proporcionando

reduções de até 90% no seu valor quando as misturas são compactadas abaixo da temperatura ideal.

Deve-se utilizar um projeto específico para as misturas, como o CAP 50/70, a fim de analisar o comportamento singular desta mistura em relação as suas propriedades mecânicas e volumétricas, possibilitando um melhor desempenho dos resultados. (LEHNEN, 2015)

No estudo realizado por Gabriela Lehen (2015) foram moldados corpos de prova em três diferentes temperaturas: 100°C, 130°C e 160°C. Visualizando o gráfico 2 pode-se verificar que o grau de compactação esteve acima do limite máximo em quase todas as misturas, exceto nos corpos de prova compactados à 100°C, onde todas as misturas apresentaram grau de compactação dentro do limite permitido pela especificação vigente, entre 97% e 100%.

Gráfico 2 – Grau de compactação x Temperatura

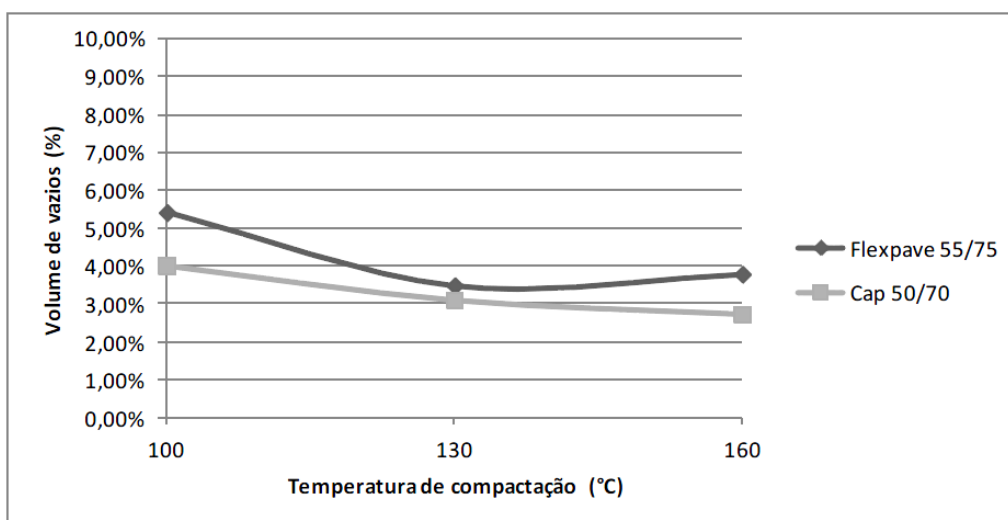


Fonte: Lehen (2015)

Já no Gráfico 3, pode-se verificar que ambas misturas asfálticas apresentaram uma diminuição em seus volumes de vazios à medida em que a temperatura de compactação foi aumentada. Também pode-se constatar a partir dos dados apresentados que o volume de vazios das misturas com CAP 50/70 são menores em relação às misturas com Flexpave 55/75 em todas as temperaturas de compactação.



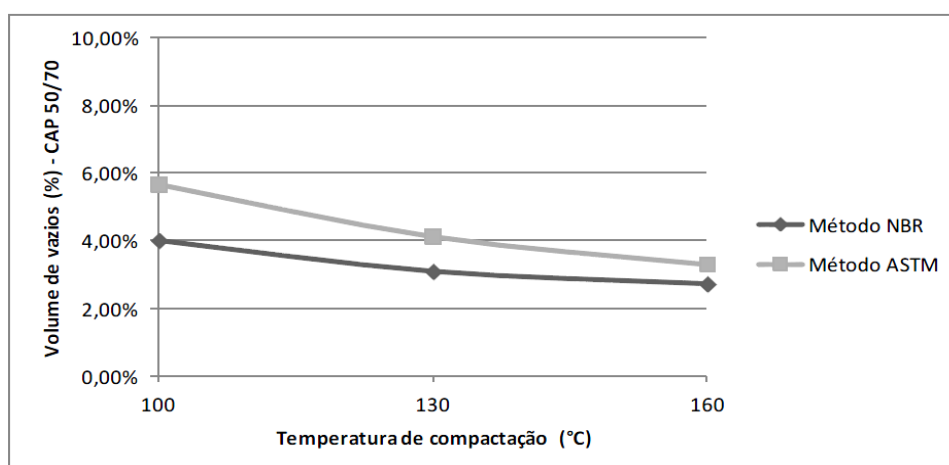
Gráfico 3 – Volume de vazios x Temperatura



Fonte: Lehen (2015)

Comparando os dois métodos utilizados por Lehen (2015), pode-se ver uma tendência de diminuição do volume de vazios se aumentada a temperatura de compactação. Todavia, enquanto o método NBR/DNER apresentou oscilação do volume de vazios nas misturas asfálticas com Flexpave 55/75, o método ASTM apresentou maior coerência nos resultados. O Gráfico 4, apresenta um comparativo na obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70.

Gráfico 4 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70



Fonte: Lehen (2015)

## **3 MATERIAIS E MÉTODO**

### **3.1 Introdução**

Este estudo tem como objetivos específicos a simulação, através da compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas, a aplicação destas em obras de pavimentação em temperatura fora do intervalo estabelecido em projeto. O estudo possibilitará a análise do impacto causado na vida útil do pavimento e das propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas, analisando o comportamento das misturas convencionais e com adição de polímero, utilizando o ligante asfáltico CAP 50/70. Para tanto, serão determinados em laboratório as seguintes propriedades das misturas asfálticas moldadas:

- Densidade aparente;
- Volume de vazios;
- Grau de compactação;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Módulo de resiliência.

Este Capítulo é destinado à descrição dos materiais e método de pesquisa que serão utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Projeto da mistura asfáltica

O projeto da mistura asfáltica utilizado no presente estudo foi elaborado pelo Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para a empresa Compasul, de Estrela-RS.

Os quadros 6 a 8 apresentam a composição e a caracterização da mistura seguindo o referido projeto.

Quadro 6 – Composição da mistura asfáltica

<b>Composição da mistura</b>				
<b>% Mistura</b>		<b>18%</b>	<b>28%</b>	<b>54%</b>
<b>Peneira</b>	<b>mm</b>	<b>Brita ¾"</b>	<b>Brita 3/8"</b>	<b>Pó-de-pedra</b>
¾ "	19,10	18,00	28,00	54,00
½ "	12,70	2,60	28,00	54,00
3/8"	9,50	0,10	25,00	54,00
Nº 4	4,76	0,10	0,90	51,20
Nº 10	2,00	0,10	0,20	35,00
Nº 40	0,42	0,10	0,20	19,70
Nº 80	0,18	0,10	0,20	13,00
Nº 200	0,074	0,10	0,20	6,70
	<b>Frações</b>	<b>Brita ¾"</b>	<b>Brita 3/8"</b>	<b>Pó-de-pedra</b>
	<b>%</b>	<b>18%</b>	<b>28%</b>	<b>54%</b>
<b>Total</b>				<b>100%</b>

Fonte: Lehen (2015)

Quadro 7 – Especificação da mistura asfáltica

<b>Especificação e mistura</b>						
<b>Peneira</b>	<b>mm</b>	<b>Limite</b>	<b>Centro Faixa</b>	<b>Faixa de trabalho</b>		<b>Mistura</b>
¾ “	19,10	100	100	100,00	100,00	100,00
½ “	12,70	80 – 100	90	80,00	91,60	84,60
3/8”	9,50	70 – 90	80	72,10	86,10	79,10
Nº 4	4,76	44 – 72	58	45,20	59,20	52,20
Nº 10	2,00	22 – 50	36	30,20	40,20	35,20
Nº 40	0,42	8 – 26	17	15,00	25,00	20,00
Nº 80	0,18	4 – 16	10	8,20	16,00	13,20
Nº 200	0,074	2 – 10	6	4,90	8,90	6,90

Fonte: Lehen (2015)

Quadro 8 – Propriedades finais da mistura

<b>Propriedades finais da mistura – Definido segundo NBR 15.619-A</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>ESP 16/91 DAER</b>	<b>Valor de projeto</b>
Teor de Betume (%)	-	4,90
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00
Relação Volume de Vazios (%)	75 a 82	78,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	17,20
Massa Esp. Max. Medida (kN/m³)	-	2,595
Massa Esp. Aparente (kN/m³)	-	2,498
Estabilidade (kgf)	>800	1900
Fluência (1/100 in)	8 a 16	15,90
Resistência à Tração (MPa)	-	1,21
Módulo de Resiliência (MPa)	-	4540
Relação Mr/Rt (adm)	-	3752
Relação Est/Fluência (kgf.m)	-	119
Relação Filler/Betume (%)	0,6 a 1,6 (Superpave)	1,39

Fonte: Lehen (2015)

### 3.2.2 Agregados

Para a realização deste estudo utilizou-se os agregados vindos da pedreira da Conpasul Construção e Serviços Ltda., localizada em Linha Santa Rita, Estrela/RS, conforme indicado na figura 9. A pedreira é constituída por rocha basáltica, predominante no Estado do Rio Grande do Sul. O estudo de Lehnem (2015) utilizou agregados oriundos de Fazenda Vilanova/RS. De acordo com o indicado no projeto foram empregados os seguintes agregados na mistura asfáltica: pó de pedra, brita 3/8" e brita 3/4", os quais estão representados na Figura 10.

Figura 9 – Localização da pedreira



Fonte: Do autor (2016)

Figura 10 – Britas



a) pó de pedra



b) brita 3/8"



c) brita 3/4"

Fonte: Conpasul (2014)

### 3.2.3 Origem dos ligantes

Os ligantes asfálticos utilizados no estudo provêm da refinaria da Petrobras Distribuidora S/A, situada em Canoas/RS, sendo esses distribuídos pela Greca Distribuidora de Asfaltos Ltda.

Para o estudo utilizou-se a mistura asfáltica CAP 50/70, com uso frequente no estado do Rio Grande do Sul, assim, facilitando sua obtenção.

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é obtido pela destilação do petróleo e apresenta qualidades e consistência próprias para o uso na construção e manutenção de pavimentos asfálticos, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

O CAP é utilizado em misturas a quente, tais como: concreto asfáltico, pré-misturado, areia-asfáltica, tratamento superficial e macadame betuminoso. É usado em vias urbanas e rodoviárias; manutenção de pavimentos; e como base para aplicação de massas asfálticas executadas com asfaltos modificados.

Apesar de suas limitações de desempenho, é o produto mais utilizado na pavimentação. O uso de CAP em revestimentos permite a construção de pavimentos flexíveis de durabilidade razoável.

O CAP não pode ser aquecido acima de 177°C, sob o risco de um possível craqueamento térmico do ligante. Portanto, o aquecimento deverá ser efetuado até obter-se a consistência adequada a sua aplicação, sendo a temperatura ideal de emprego obtida pela relação viscosidade/temperatura. Não deverá ser aplicado em dias de chuva, em superfícies molhadas e em temperaturas ambiente inferior a 10°C.

Durante o manuseio deste material, deve-se utilizar EPI, o equipamento de proteção individual. As especificações técnicas do CAP 50/70 são apresentadas no Quadros 9:

Quadro 9 - Especificações técnicas do CAP 50/70

Características	Unidades	Métodos		Especificação
		ABNT	ASTM	CAP 50/70
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	NBR 6576	D 5	50 – 70
Ponto de amolecimento, mín	°C	NBR 6560	D 36	46
Viscosidade Saybolt-Furol	SSF	NBR 14950	E 102	
a 135°C, mín				141
a 150°C, mín				50
a 170°C				30 - 150
ou Viscosidade Brookfield	cP	NBR 15184	D 4402	
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín				274
a 150°C, SP 21, mín				112
a 170°C, SP 21				57 - 285
Índice de suscetibilidade térmica				
Ponto de fulgor, mín	°C	NBR 11341	D 92	235
Solubilidade em trocloroetileno, mín	% massa	NBR 14855	D 2042	99,5
Dutibilidade a 25°C, mín	cm	NBR 6293	D 113	60
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos		NBR 15235	D 2872	
Variação em massa, máx	%		D 2872	0,5
Dutibilidade a 25°C, mín		NBR 6293	D 113	20
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	NBR 6560	D 36	8
Penetração retida, mín	%	NBR 6576	D 5	55

Fonte: Resolução nº19 de 11 de julho de 2005 da ANP - Regulamento Técnico ANP nº03/2005.

Quadro 10 – Temperaturas convencionais de misturas e compactação – Ligantes asfálticos

<b>Temperaturas convencionais de misturas e compactação – Ligantes asfálticos</b>	
	<b>Temperaturas (°C)</b>
<b>Ligante asfáltico</b>	150 – 155
<b>Agregado</b>	160 – 165
<b>Compactação (temperatura mínima)</b>	135

Fonte: adaptado pelo autor com base em Greca Asfaltos (2014)

### 3.2.4 Programa SisPav

O dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida do projeto e, também, garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais. (FRANCO, 2007)

SisPav é um programa computacional que traz uma nova contribuição para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Utiliza a análise elástico-linear e a elástico não linear, sendo os danos estimados por modelos de previsão de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admissível no topo do subleito, adequados às condições ambientais do país, tanto quanto possível atualmente, e considerados diversos tipos de configuração de eixos. Para permitir a calibração, validação e, posteriormente, seu uso, o método foi consolidado em um programa de computador. O programa, SisPav, incorpora a análise de confiabilidade, a análise de tensões e deformações e interfaces gráficas para visualização dos resultados. (FONSECA, 2013)

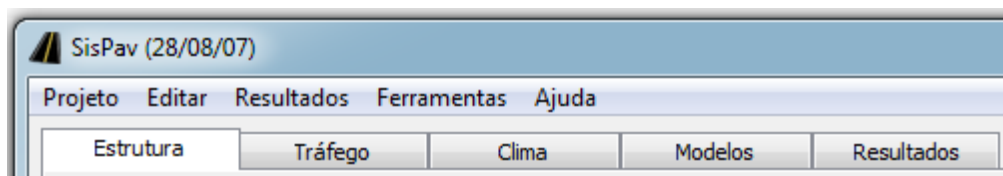
O desenvolvimento do SisPav tem objetivo de melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar diversos materiais cujo desempenho de campo ainda não se tem experiência suficiente, e



considerar, também, as condições ambientais e de tráfego diferentes das implícitas no Método Empírico do DNER, ainda utilizado no país.

O Menu principal do programa possui as opções *Projeto*; *Editar*; *Resultados*; *Ferramentas*; e *Ajuda*, conforme detalhe apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Menu principal do programa SisPav



Fonte: Do autor (2016)

A tela de abertura do programa (FIGURA 12) se refere à entrada de dados referentes à estrutura do pavimento a ser analisada. É possível indicar cada camada como mistura asfáltica, solo melhorado com cimento, solo cimento, brita graduada com cimento, concreto compactado a rolo, material granular, solo laterítico, solos finos, siltosos e argilosos.

A cada camada inserida, para cada material constituinte, o programa sugere valores dos principais parâmetros como Módulo de Resiliência, coeficiente de Poisson e o modelo constituinte da equação do Módulo de Resiliência em função do tipo de material. Além dos parâmetros mencionados, o programa também permite informar outros parâmetros de caracterização dos materiais selecionados com base nas normas de especificação de materiais e serviços previstos no DNIT.

O programa permite a entrada de até 8 camadas e limita suas espessuras durante o dimensionamento entre 10cm e 60cm para todas as camadas, com exceção do revestimento que varia de 5cm a 20cm, por questões práticas. Quando, durante o dimensionamento, o programa atingir o limite inferior da espessura significa que a estrutura suporta as condições do carregamento e do clima impostos. Porém, se atingir o limite superior é por que a estrutura não atende as exigências do projeto. Nos dois casos, segundo Franco (2007), sugere-se rever manualmente a

estrutura, alterando as propriedades dos materiais, adicionando ou removendo camadas de forma a adequar a nova estrutura aos requisitos de projeto.

Figura 12 - Tela de entrada de dados de caracterização da estrutura (SisPav)

Camada	Tipo	Espessura (m)	Coef Poisson	Modelo	k1 / Mr / Ei (MPa)	k2 / Ef (MPa)	k3	k4	k5	Aderência
1	Material asfáltico	0.050	0.300	3	3000.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
2	Material granular	0.200	0.350	3	250.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
3	Material granular	0.200	0.350	3	250.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
SL	Solos finos, siltosos ou argilosos	0.000	0.400	3	60.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

Fonte: Do autor (2016)

O passo seguinte é a configuração da composição do tráfego. Nesta etapa informa-se o tipo de eixo, o volume para o primeiro ano obtido através de contagens, pesquisas em estudos existentes ou valores estimados, taxa de crescimento do tráfego ao ano, carga, pressão do pneu, vida de projeto informada em anos, percentual de veículos na faixa de projeto, variação lateral do tráfego, alinhamento crítico e variação sazonal ao longo do ano (FIGURA 13). À medida que os eixos são inseridos, o programa calcula automaticamente o Número N equivalente de repetições do eixo padrão, conforme o método do DNIT (2006). Este valor é atualizado quando qualquer informação relativa ao peso, volume de tráfego, taxa de crescimento, número de anos etc. é alterado pelo projetista. (FRANCO, 2007)

Figura 13 - Tela de entrada de dados de caracterização do tráfego (SisPav)

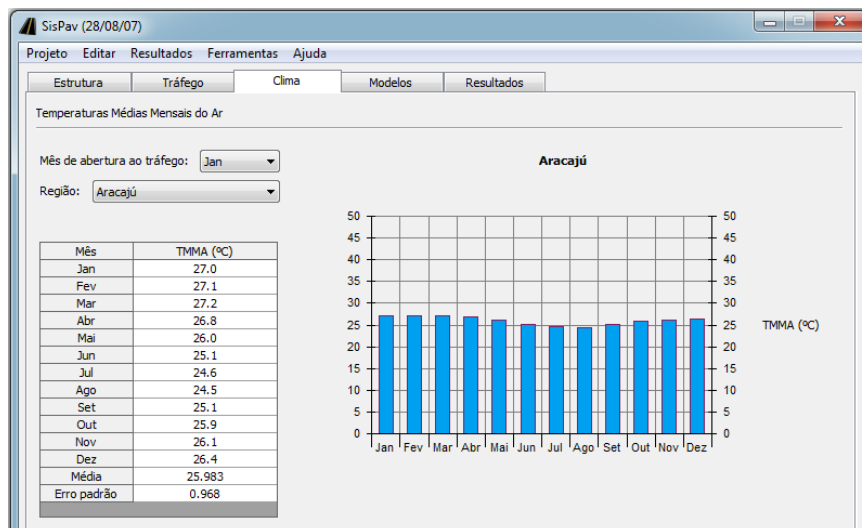
Eixo	Tipo	Configuração	Rodas	Volume (1º Ano)	Taxa (%aa)	Carga (kg)	Pressão (MPa)
1	1	Eixo Simples	2	25000.00	1.0000	6000.00	0.8000
2	5	Eixo duplo	4	17500.00	1.0000	10000.00	0.8000
3	7	Dois eixos duplos em tandem	8	7500.00	1.0000	17000.00	0.8000
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							

Fonte: Adaptado por Lehen (2015)

Informações quanto à temperatura do ar ao longo do ano configurando a influência do clima da região são informados na aba Clima do SisPav, sendo necessário somente escolher a capital e o mês, para que o Programa carregue os dados de seu banco de dados (FIGURA 14). Também é possível informar dados específicos do local da obra. As últimas linhas da tabela descrita na janela Clima (Média e Erro padrão) são calculadas automaticamente. Da mesma forma, o gráfico é atualizado quando qualquer informação na tabela for alterada.

O programa não avalia o efeito da variação da umidade sobre os materiais de pavimentação e o subleito por considerar que a umidade de equilíbrio é alcançada. Portanto, o SisPav não apresenta ao projetista opções para entrada de parâmetros relacionados a variabilidade de umidade dos materiais. (FRANCO, 2007)

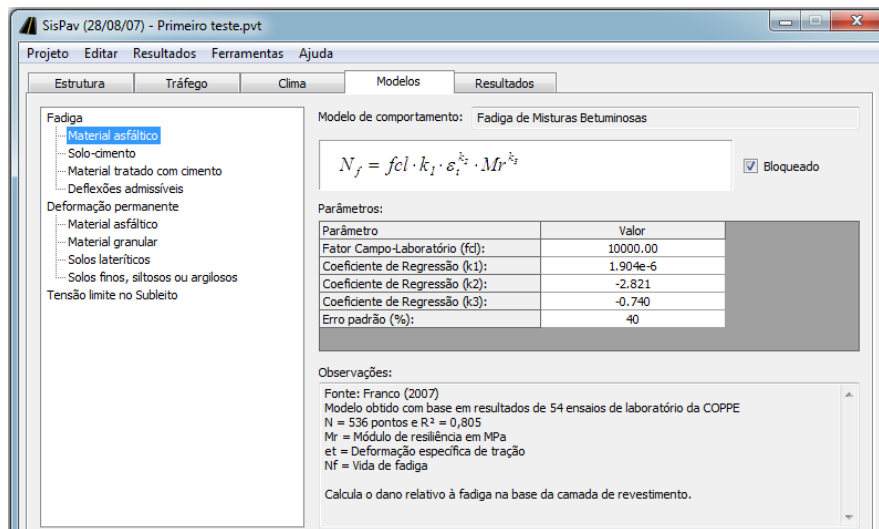
Figura 14 - Tela clima do programa SisPav



Fonte: Do autor (2016)

Na aba seguinte têm-se os modelos de danos que podem ocorrer na estrutura de um pavimento. Ao selecionar na lista o modelo desejado, o Programa apresenta o nome do modelo de comportamento; a sua expressão de regressão matemática; os parâmetros da regressão; o fator campo-laboratório; e informações diversas como a fonte de referência, de onde se obteve o modelo e os parâmetros. A tela modelos é apresentada na Figura 15 abaixo.

Figura 15 – Tela modelos do SisPav



Fonte: Do autor (2016)

Na tela opções apresentada na Figura 16, o projetista pode alterar parâmetros para otimizar os cálculos do dimensionamento dos pavimentos. Dependendo da análise, o programa pode não convergir para uma espessura ótima que atenda aos requisitos de projeto durante o dimensionamento. Assim, foi definido um limite máximo para o número de tentativas que o programa irá fazer para realizar o dimensionamento. O número padrão escolhido foi de vinte, uma vez que o programa, na maioria das vezes, converge ou para espessura ótima ou para os valores limites de espessura antes das vinte tentativas. O valor também pode ser alterado pelo projetista, caso ache necessário. (FRANCO, 2007)

Figura 16 – Tela opções do SisPav

Opções

Tolerância do dimensionamento (%): 2.00

Número máximo de tentativas: 20

Nível de confiabilidade (%): 95%

☒ Considerar o dano relativo à deflexão máxima admissível na superfície do pavimento.

☒ Considerar o dano relativo à tensão admissível no topo do subleito do pavimento.

☒ Estimar a Deformação Permanente na superfície do pavimento. Limite (cm) = 1.25

☒ Calcular a bacia de deflexão para controle de campo.

Bacia de deflexão de projeto

☐ FWD

☒ Viga Benkelman

Raio do carregamento (m): 0.108

Pressão de contato (MPa): 0.56

Posição dos Sensores (m):

1	2	3	4	5	6	7	8
0.00	0.20	0.30	0.45	0.60	0.90	1.20	1.50

OK Cancel

Fonte: Do autor (2016)

Neste momento, o programa SisPav já está com os dados necessários para realizar a análise da estrutura informada, calculando a vida útil do pavimento ou dimensionando uma camada da estrutura da proposta pelo usuário (FONSECA, 2013). O projetista pode ainda verificar os resultados na aba referente, inclusive com ilustrações gráficas ou através de planilhas dos resultados (FIGURA 17). Ele pode também emitir um relatório contendo os dados de entrada, os modelos utilizados e os resultados obtidos.

Figura 17 – Aba resultados do programa SisPav

AEMC (28/08/07)

Projeto Editar Ajuda

Estrutura Carregamento Resultados

Iterações: 10 Calcular Pontos >> Salvar Excel

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ux (μm)	Uy (μm)	Uz (μm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sz (MPa)
1	0.00	0.00	0.0000						
2	0.00	0.00	0.1499						
3	0.15	0.00	0.1499						
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

Fonte: Do Autor (2016)

### **3.3 Método**

#### **3.3.1 Introdução**

Para a realização do presente estudo foram confeccionadas misturas asfálticas com CAP 50/70.

Após ser realizado todo o projeto da mistura asfáltica, com seus devidos ensaios e cálculos, encontrou-se o teor ótimo de asfalto. Com este valor o estudo seguiu com a moldagem de 9 corpos de prova, sendo divididos em 3 diferentes temperaturas:

- 3 corpos de prova com CAP 50/70 compactadas à 100°C;
- 3 corpos de prova com CAP 50/70 compactadas à 130°C;
- 3 corpos de prova com CAP 50/70 compactadas à 160°C;

A escolha destas temperaturas e deste intervalo de tempo teve por objetivo simular a compactação das misturas asfálticas em obras de pavimentação fora da sua temperatura ideal. Portanto, a temperatura de 160°C por estar um pouco acima da temperatura máxima ideal para a compactação da mistura, de acordo com os ligantes asfálticos. A temperatura de 130°C por estar um pouco abaixo da temperatura mínima ideal, simulando um pequeno atraso na compactação da mistura. Por fim, a temperatura de 100°C, simulando assim um atraso ainda maior.

A confecção dos 9 corpos de prova visa a obtenção de maior precisão e atende as exigências da especificação DNER-ME 043 (1995).

#### **3.3.2 Preparo dos agregados**

Inicialmente, os agregados extraídos da pedreira foram peneirados e separados em 8 diferentes faixas granulométricas, seguindo a composição especificada no projeto.

De acordo com DNER-ME 043 (1995), o peso final do corpo de prova deve ficar próximo à 1.200,00 g. No presente trabalho foi definido o peso de 1.250,00 g para cada corpo de prova. Diante disso, o Quadro 11 apresenta juntamente da composição granulométrica da mistura asfáltica, a quantidade em gramas calculada para cada fração de agregado empregada para a confecção de 1 corpo de prova.

Quadro 11 – Composição granulométrica de um corpo de prova

<b>Peneira</b>	<b>Mistura</b>	<b>Percentual (%)</b>	<b>Peso (g)</b>
$\frac{3}{4}$ "	100,00	0,00	0,00
$\frac{1}{2}$ "	84,60	15,40	192,50
3/8"	79,10	5,50	68,75
Nº 4	52,20	26,90	336,25
Nº 10	35,20	17,00	212,50
Nº 40	20,00	15,20	190,00
Nº 80	13,20	6,80	85,00
Nº 200	6,90	6,30	78,75
Passante Nº 200	0,00	6,90	86,25
<b>Total</b>		<b>100,00</b>	<b>1.250,00</b>

Fonte: Lehen (2015)

Os agregados foram peneirados separadamente e em seguida separados em recipientes de acordo com sua faixa granulométrica.

Figura 18 – Separação dos agregados



Fonte: Do Autor (2016)

Para a preparação da mistura, realizou-se a secagem dos agregados com a utilização da estufa, apresentada a seguir. O intervalo de temperatura utilizado foi entre 105°C e 110°C, respeitando as exigências da especificação vigente.

Figura 19 – Estufa



Fonte: Do Autor (2016)



Realizou-se na sequência a pesagem e separação dos agregados na correta granulometria para a moldagem de um corpo de prova. Cada fração foi deixada em recipientes diferentes e mantidas aquecidas até o momento da moldagem, com objetivo de respeitar a temperatura correta e minimizar erros.

Figura 20 – Separação granulométrica dos agregados



Fonte: Do Autor (2016)

Após saírem da estufa os agregados ainda foram aquecidos em uma frigideira. Colocada sobre o fogo, buscou-se uma temperatura de 170°C, respeitando exigências da especificação, a qual estabelece que esta temperatura deva estar entre 10°C e 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante, no caso 160°C, não podendo ultrapassar 177°C.

Figura 21 – Aquecimento dos agregados



Fonte: Do Autor (2016)

O ligante foi aquecido a 160°C, respeitando a temperatura de aquecimento adequada, não ultrapassando o tempo de 1 hora de aquecimento.

Figura 22 – Aquecimento do ligante



Fonte: Do Autor (2016)

Para a adição do ligante com os agregados, abriu-se um espaço no meio da frigideira, para uma melhor mistura posterior. Conforme a figura abaixo foi realizada a pesagem do ligante para cada corpo de prova.

Figura 23 – Adição do ligante asfáltico



Fonte: Do Autor (2016)

Efetuuou-se a mistura conforme indicado na especificação, respeitando um intervalo de 2 a 3 minutos, até que todos os agregados estivessem devidamente envoltos pelo ligante. A execução da mistura e o aspecto final são mostrados na figura 25.



Figura 24 – Aspecto final da mistura



Fonte: Do Autor (2016)

Com a mistura pronta, iniciou-se o processo de moldagem e compactação do corpo de prova. A fim de simular o envelhecimento de curto prazo da mistura asfáltica durante o período da usinagem, manteve-se a mistura asfáltica por 2 horas dentro de uma estufa, utilizando a mesma temperatura em que a mistura seria posteriormente compactada, adotando o procedimento Superpave (2001). Para que a mistura asfáltica não perdesse bruscamente a sua temperatura no instante da compactação, inseriu-se na estufa, junto da mistura, o molde de compactação para ser também aquecido.

Passadas 2 horas, colocou-se o molde na posição correta no suporte de compactação e introduziu-se no seu fundo uma folha de papel filtro do mesmo tamanho da seção do molde. Logo em seguida, adicionou-se a mistura no molde de uma só vez, acomodando-a através de 15 golpes enérgicos no seu interior e extremidade, acrescidos de 10 golpes em seu centro.

Com a mistura já acomodada no molde, aplicou-se 75 golpes com o soquete situado a uma altura de 45,72 cm do corpo de prova, e em seguida virou-se o corpo

de prova de lado, aplicando mais 75 golpes, de acordo com a ilustração da Figura 25.

Figura 25 – Compactação da mistura



Fonte: Do Autor (2016)

Cada corpo de prova foi removido do molde cuidadosamente após sua compactação, sendo colocado sobre uma superfície lisa e plana, mantendo-o em repouso por 12 horas, à temperatura ambiente.

Após a moldagem dos corpos de prova, realizou-se primeiramente, a aferição das dimensões de cada corpo de prova. Esta é necessária uma vez que o corpo de prova pronto deve apresentar altura de 63,50 mm, sendo admissível uma variação de 1,3 mm tanto para mais quanto para menos, e um diâmetro de 100 mm, sendo aceita uma variação de até 2 mm para mais.

As dimensões foram aferidas através da utilização de um paquímetro. Conforme exigido pela especificação, mediu-se os corpos de prova em 4 diferentes pontos, tanto em relação a altura, quanto ao diâmetro. Obteve-se os valores finais através do cálculo da média dos valores encontrados.

Figura 26 – Corpos de prova em repouso



Fonte: Do Autor (2016)

Na sequência os corpos de prova foram pesados, primeiramente secos e posteriormente submersos na água, estando esta à temperatura de 25°C, conforme exige a especificação vigente. Após serem retirados da água, os corpos de prova tiveram sua superfície imediatamente secada, e novamente foram pesados. A pesagem nestas três modalidades é necessária para a obtenção das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas.

Figura 27 – Pesagem dos corpos de prova

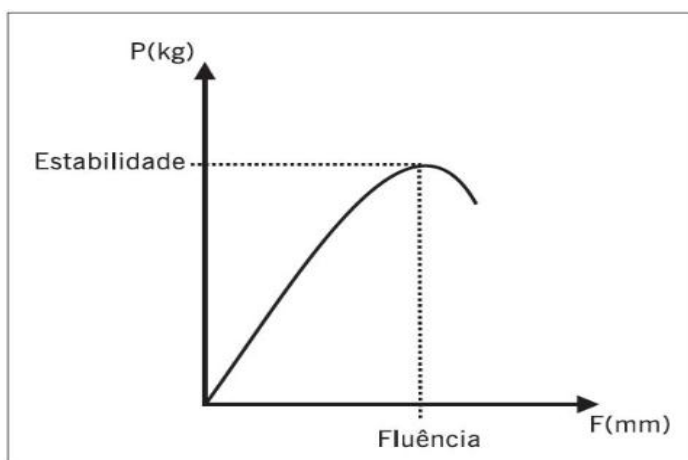


Fonte: Do Autor (2016)

### 3.3.3 Ensaio Marshall

Este método fixa o modo pelo qual se determina a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas usinadas a quente, utilizando o aparelho Marshall. É o método de dosagem mais usado mundialmente e faz uso da compactação por impacto. Seu nome faz referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940. (BERNUCCI et al, 2008, p. 205)

Gráfico 5 – Gráfico estabilidade x fluência



Fonte: Unesp (2015)



Figura 28 – Ensaio de estabilidade e fluência



Fonte: Unesp (2015)

A execução dos corpos de prova das misturas asfálticas deve atender a especificação DNER-ME 043 (1995). Deste modo, devem ser seguidos os critérios apresentados a seguir.

1. Determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e dos agregados;
2. Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica;
3. Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida (Quadro 12);



Quadro 12 – Exemplo da composição dos agregados

Peneira	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra	Areia de campo	Fíler	Faixa de projeto			Faixa C	
	25%	36%	20%	18%	1%	%mín.	% alvo	%máx.	%mín.	%máx.
3/4"	100	100	100	100	100		100,0			100
1/2"	72	100	100	100	100	86	93,1	100	80	100
3/4"	33	98	100	100	100	76	82,6	90	70	90
Nº 4	5	30	98	100	100	46	50,6	56	44	72
Nº 10	3	6	82	99	100	33	38,0	43	22	50
Nº 40	2	2	39	68	100	17	22,2	27	8	26
Nº 80	1	1	21	41	100	10	13,1	16	4	16
Nº 200	0	1	10	21	95	5	7,1	10	2	10

Fonte: (BERNUCCI et al, 2008, p. 218)

4. Escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou  $0,17 \pm 0,02 \text{ Pa.s}$  se medida com o viscosímetro rotacional. A temperatura do ligante não deve ser inferior a  $107^\circ\text{C}$  nem superior a  $177^\circ\text{C}$ . A temperatura dos agregados deve ser de 10 a  $15^\circ\text{C}$  acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar  $177^\circ\text{C}$ .  
A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de 125 a 155SSF ou  $0,28 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$ .
5. Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de CPs a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo 3 CPs. Conforme a experiência do projetista, para a granulometria selecionada, é sugerido um teor de asfalto (T, em %) para o primeiro grupo de CPs. Os outros grupos terão teores de asfalto acima ( $T+0,5\%$  e  $T+1,0\%$ ) e abaixo ( $T-0,5\%$  e  $T-1,0\%$ ).
6. Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos-de-prova, obtêm-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura). Determinam-se para cada corpo-de-prova suas massas seca (MS) e submersa em água (MSsub). Com estes valores é possível obter a massa específica aparente dos corpos-de-prova

(Gmb), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), vai permitir obter as relações volumétricas típicas da dosagem;

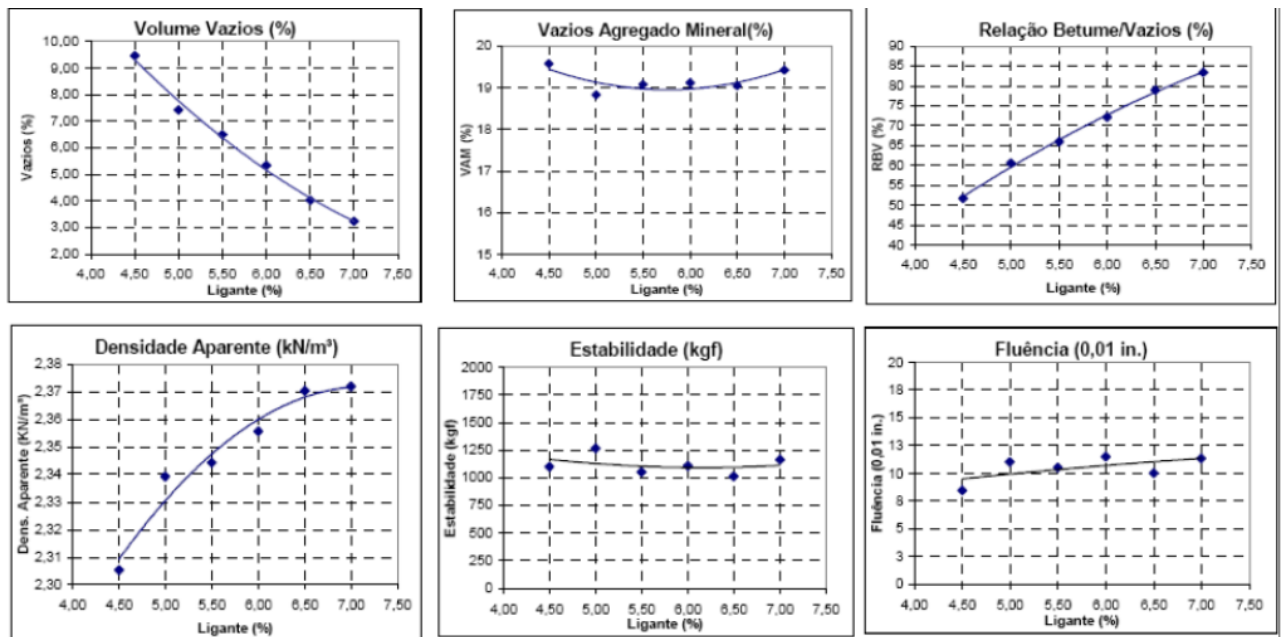
7. A partir do teor de asfalto do corpo de prova (%a), ajusta-se o percentual em massa de cada agregado;
8. Com base em %n, %a, e nas massas específicas reais dos constituintes ( $G_i$ ), calcula-se a DMT correspondente ao teor de asfalto considerado (%a);
9. Cálculo dos parâmetros de dosagem para o corpo de prova: volume do CP, massa específica aparente da mistura, volume de vazios, porcentagem em massa dos agregados, vazios do agregado mineral, relação betume/vazios;
10. Após as medidas volumétricas, os corpos-de-prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos. Retira-se cada corpo-de-prova colocando-o imediatamente dentro do molde de compressão. Determinam-se, então, por meio da prensa Marshall, os seguintes parâmetros mecânicos.

Estabilidade (N): resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo de prova, quando moldado e ensaiado de acordo com o processo pelo método Marshall. (DNER-ME 043, 1995)

Fluência (mm): deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima. (DNER-ME 043, 1995)

Com todos os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, são plotadas seis curvas em função do teor de asfalto que podem ser usadas na definição do teor de projeto. A Figura 19 apresenta essas curvas.

Quadro 13 - Exemplos de curvas dos parâmetros determinados na dosagem Marshall



Fonte: (BERNUCCI et al, 2008, p. 224)

### 3.3.3.1 Considerações finais sobre a dosagem Marshall

É importante considerar que a dosagem Marshall, realizada normalmente no país, segue as orientações da norma do DNER e que esta, embora parecida com a da ASTM e com os procedimentos recomendados pelo Instituto de Asfalto norte-americano, não foi talvez atualizada de acordo com as mudanças ocorridas nas citadas normas estrangeiras ao longo de revisões sucessivas, em pelo menos dois pontos importantes:

- a consideração da absorção de ligante pelos agregados e o uso da massa seca com superfície saturada;
- o uso de fórmula para cálculo da DMT. Na ASTM e no Instituto de Asfalto só se utiliza a Gmm, o que já leva em conta a absorção dos agregados e tem interferência muito grande nas determinações das relações volumétricas.

Assim, Bernucci et al (2008) julga que há necessidade de se modificar as normas do ensaio Marshall de dosagem de concreto asfáltico urgentemente para adaptá-la ao padrão ASTM que é também o padrão usado em muitos outros países,

nestes aspectos comentados e em outros. Apesar da existência de normas ABNT e DNER padronizando o método Marshall, há ainda uma dispersão significativa em seus resultados, e entre os diversos fatores que causam esta dispersão, citam-se a forma de compactação dos corpos-de-prova, as características dos equipamentos usados e as condições operacionais do processo, o que caracteriza ainda uma variabilidade de resultados sob condições idênticas de materiais (Coelho e Sória, 1992).

Motta (1998) relata algumas críticas relativas ao método Marshall. Entre elas, a pouca representatividade do método de compactação em relação ao campo e a grande influência na determinação do teor de projeto derivada de fatores ligados à preparação dos corpos-de-prova (tipo de soquete, formas de apoio etc.).

Francken et al (1997) comentam que em um importante estudo interlaboratorial realizado em nível internacional pela RILEM, verificou-se uma variação entre 5,4 e 6,8% de teor de projeto determinado através do método de dosagem Marshall, para uma mesma mistura testada. Uma comparação entre os resultados dos diversos laboratórios envolvidos no estudo e o laboratório de referência apresentou considerável diferença, demonstrando assim que na utilização do método Marshall os procedimentos de trabalho dos laboratórios não são sempre semelhantes. Os autores concluem que há necessidade de estar sempre se revendo normas, definições, equipamentos, procedimentos de preparação de amostras, calibrações e interpretações de resultados, de forma a retrainar os técnicos e melhorar a reprodutibilidade e a confiança nos resultados. Outro fator relevante nesse processo é o reduzido número de corpos-de-prova exigidos pela norma (mínimo de três), impossibilitando assim qualquer análise estatística dos resultados.

Reforça-se também a necessidade de se explorar melhor a granulometria dos agregados disponíveis além de se dosar cada mistura em função do asfalto escolhido e da estrutura na qual será empregada. Para um bom projeto é preciso compatibilizar as características do concreto asfáltico com toda a estrutura do pavimento, o que não é garantido quando se obtém o teor de projeto a partir de requisitos tradicionais. Recomenda-se, durante a dosagem, testar as misturas com

ensaios tais como RT, MR e fadiga. Mais forte ainda deve ser o alerta quanto à necessidade de fiscalização no campo, tanto nas usinas quanto na pista, pois todo sucesso de qualquer projeto passa pela fabricação e aplicação correta da mistura.

### 3.3.4 Determinação da densidade aparente

Através dos dados obtidos na pesagem dos corpos de prova determinou-se a densidade aparente das misturas asfálticas.

O método da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) é hoje utilizado internacionalmente para a determinação da densidade aparente das misturas asfálticas, exceto no Brasil, onde o cálculo utilizado é dado pela NBR e pelo DNER. (ANTT, 2014)

Deste modo, determinou-se a densidade aparente através dos dois métodos existentes. Segundo Marques (2004), o método da ASTM D 2726 considera os vazios superficiais através da utilização do peso úmido, obtido com a secagem da superfície logo após a imersão na água. Já no método adotado tanto pela NBR 12891 (1993) e como pelo DNER 117 (1994) obtém-se o volume do corpo de prova da mistura asfáltica sem considerar os vazios superficiais. As Equações utilizadas para a determinação destes valores pelo método ASTM D 2726 (1) e método NBR 18291 (1993) / DNER 117 (1994) (2) são apresentadas abaixo, respectivamente.

$$Gmb = \frac{Wd}{Wssd - Wsub} \quad (1)$$

Onde:

Gmb: densidade relativa aparente do corpo de prova compactado;

Wd: peso ao ar ou peso seco;

Wssd: peso medido na condição saturada de superfície seca;

Wsub: peso medido na condição saturada imerso em água.

$$DMT = \frac{P_{cap} + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_{cap}}{G_{cap}} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (2)$$

Onde:

DMT: densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;

P: peso do material constituinte;

G: densidade real dos materiais constituintes.

### 3.3.5 Determinação do índice de vazios

Asphalt Institute *apud* Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (2014) define o volume de vazios ( $V_v$ ) como "a porcentagem de vazios de ar na amostra compactada".

A especificação DNIT 031 (2006) determina o percentual limite de vazios presentes em uma mistura asfáltica:

- ☐ camada de rolamento: de 3 a 5%;
- ☐ camada de ligação (binder): de 4 a 6%.

O volume de vazios é diretamente relacionado com a densidade aparente da mistura asfáltica. Consequentemente, com a existência de dois métodos para a obtenção desta, é possível determinar o volume de vazios também de duas formas. Porém, ao contrário da densidade aparente, o cálculo do volume de vazios é muito semelhante se comparado o cálculo utilizado pelo Asphalt Institute *apud* ANTT (2014) com o cálculo utilizado pela NBR 16273 (2014). O que difere entre os dois métodos é justamente o modo de obtenção da densidade aparente. Sendo assim, determinou-se também o volume de vazios através destes dois métodos existentes.

Primeiramente seguindo Asphalt Institute *apud* ANTT (2014), a partir da seguinte Equação (3):

$$V_v = 100 \times \frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}} \quad (3)$$

Onde:

Vv: volume de vazios;

Gmm: densidade máxima medida da mistura asfáltica solta;

Gmb: densidade relativa aparente do corpo de prova compactado.

O segundo método utilizado, é representado através da Equação abaixo (4), sendo esse padronizado pela NBR 16273 (2014):

$$V_v = \frac{(DMT - d)}{DMT} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

Vv: volume de vazios;

DMT: densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;

d: densidade aparente do corpo de prova compactado.

### 3.3.6 Determinação do grau de compactação

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 52), o grau de compactação de uma mistura asfáltica é o "quociente resultante da divisão da massa específica obtida em campo, pela massa específica máxima obtida no laboratório." Realiza-se o controle do grau de compactação das misturas asfálticas a fim de verificar se a compactação foi realizada de forma adequada. A especificação DNER 385 (1999) determina que o grau de compactação de uma mistura asfáltica não pode ser inferior a 97%.

"A compactação de uma camada asfáltica de revestimento aumenta a estabilidade da mistura asfáltica, reduz seu índice de vazios, proporciona uma superfície suave e desempenada e aumenta sua vida útil." (BERNUCCI ET AL, 2008, p. 389)

Para o presente estudo, adotou-se a massa específica máxima indicada no projeto (Anexo I). Os resultados provêm da utilização da Equação 5, demonstrada abaixo.

$$G_c = \frac{\gamma_s \text{ campo}}{\gamma_s \text{ máx. laboratório}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

GC: grau de compactação;

$\gamma_s$  (campo): massa específica obtida em campo;

$\gamma_s$ .máx. (laboratório): massa específica máxima obtida no laboratório.

Uma vez que se utilizou dois métodos distintos para a determinação da densidade aparente das misturas asfálticas, conforme já mencionado no trabalho, o grau de compactação das misturas asfálticas também foi calculado considerando as diferentes densidades obtidas, apresentando, conseqüentemente diferentes resultados.

### 3.3.7 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Para o controle da qualidade da mistura, a especificação DNIT 031 (2006) estabelece que seja realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A especificação DNIT 036 (2010) determina os critérios para realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Conforme já mencionado, antes da realização do ensaio aferiu-se a altura e o diâmetro dos corpos de prova. Atendendo as exigências, os corpos de provas foram mantidos em estufa à temperatura de 25°C durante aproximadamente 2 horas, sendo permitida uma variação de 0,10°C tanto para mais quanto para menos. Na sequência cada corpo de prova foi posicionado sobre uma superfície cilíndrica, composta por dois frisos metálicos, com uma das faces curva e comprimento igual ao corpo de prova.



Após o posicionamento correto, aplicou-se uma carga progressiva no corpo de prova, com velocidade de deformação de 0,80 mm/s. A especificação permite uma variação de 0,01 mm/s tanto para mais quanto para menos. A carga foi aplicada até o momento de ruptura do corpo de prova, dividindo-o em duas metades, segundo o plano diametral vertical. As Figura 29 e 30 demonstram o ensaio realizado.

Figura 29 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: Do Autor (2016)

Figura 30 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: Do Autor (2016)

Com o valor obtido no ensaio calculou-se a resistência à tração, através da seguinte Equação (6):

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_R$ : resistência à tração, em MPa;

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

### 3.3.8 Determinação do módulo de resiliência

Hveem *apud* Bernucci et al (2008), define o módulo de resiliência como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. De acordo com DNER 133 (1994), o módulo de resiliência é definido como A relação entre a tensão de

tração ( $\sigma t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável ( $\epsilon t$ ) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T).

O módulo de resiliência é expresso pela Equação abaixo (7).

$$MR = \frac{\sigma t}{\epsilon t} \quad (7)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência

$\sigma t$ : tensão de tração;

$\epsilon t$ : deformação específica recuperável.

Primeiramente posicionou-se o corpo de prova no interior do suporte para fixação dos transdutores. Em seguida, colocou-se o corpo de prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos. É necessário sempre observar o perfeito encaixe das partes. A Figura 31 representa a realização do ensaio.

Figura 31 - Ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Do Autor (2016)

O ensaio deu-se através de uma carga vertical repetida aplicada 200 vezes diametralmente no corpo de prova, obtendo-se uma tração menor ou igual a 30% daquela obtida no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A carga foi aplicada a uma frequência de 60 ciclos por minuto, com duração de 0,10 segundo. Na sequência registrou-se no oscilógrafo a deformação resiliente para 300, 400 e 500 aplicações de carga.

A partir dos valores obtidos utilizou-se a Equação abaixo (8) para calcular o módulo de resiliência.

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (8)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência, em MPa;

F: carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova, em N;

$\Delta$ : deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F), em cm;

H: altura do corpo-de-prova, em cm;

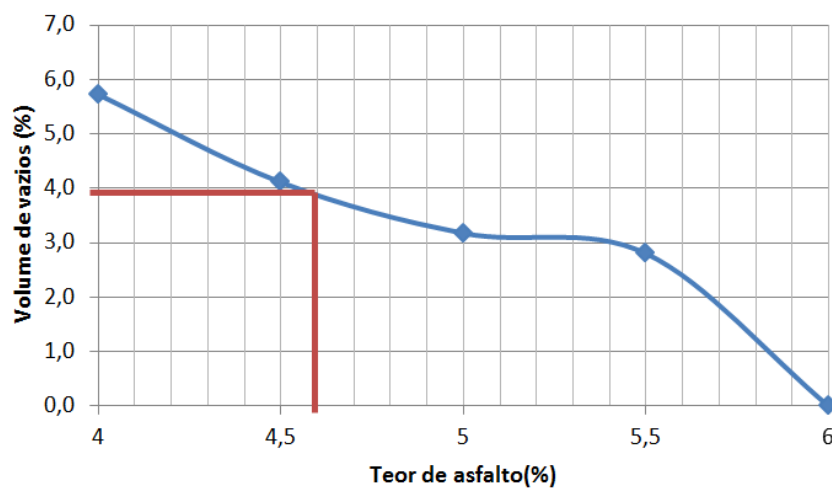
$\mu$ : coeficiente de Poisson.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Determinação do teor de projeto

Com a confecção do projeto de mistura asfáltica e seus devidos ensaios, chegou-se ao teor ótimo de asfalto de 4,6% para um valor de 4% de volume de vazios. Este valor mostrou-se inferior em 0,3% quando comparado ao estudo de realizado por Lehnen (2015). A redução do teor de asfalto mostrou que o novo projeto estava de acordo, pois com um teor de projeto de ligante inferior, teremos redução das densidades máximas e do volume de vazios, obtendo assim uma redução de custo final.

Gráfico 6 – Teor de asfalto x Volume de vazios



Fonte: Do Autor (2016)

## 4.2 Propriedades finais da mistura

Na tabela abaixo encontram-se todas as propriedades finais definidas segundo o método da NBR 15.619-A.

Tabela 1 - Propriedades finais da mistura

Propriedade	ESP 16/91 DAER	Valor de projeto
Teor de Betume (%)	---	4,60
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	77,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 16	15,60
Massa esp. Máx. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	---	2,635
Massa esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	---	2,532
Estabilidade (kgf)	> 800	2800
Fluência (1/100 in)	8 a 16	19
Resistência à tração	---	1,9
Módulo de Resiliência (MPa)	---	7850
Relação Mr/Mt (adm)	---	4131,57
Relação Est/Fluência (kgf.m)	---	147

Como visto na tabela acima, o projeto da mistura asfáltica de CAP 50/70 atendeu a todos os requisitos das normas, exceto na fluência e no índice de vazios do agregado mineral. Para este projeto a fluência ficou com resultados acima do esperado, algo já esperado, pois fazendo um comparativo com o projeto de mistura asfáltica Flexpave 55/75 pode-se verificar uma fluência média de 15,9 (1/100 in), sendo que o limite máximo era de 16 (1/100 in).

## 4.3 Moldagem em diferentes temperaturas

Para a realização dos ensaios das misturas asfálticas com CAP 50/70 foram adotadas 3 diferentes temperaturas de compactação: 100°C, 130°C, e 160°C, respeitando assim um intervalo de 30°C entre elas. Em todos os casos, a energia de

compactação aplicada foi de 75 golpes por face. Para cada tipo de mistura, associou-se 3 amostras de cada temperatura, totalizando 9 corpos de prova.

Os dados obtidos através da realização dos ensaios são apresentados a seguir, através de tabelas e gráficos, contemplando a análise das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas confeccionadas, além da análise sobre o impacto na vida útil do pavimento causado pela alteração da temperatura de compactação das misturas asfálticas.

As características volumétricas das misturas asfálticas são apresentadas através da densidade aparente, do volume de vazios e do grau de compactação. Tratando-se das características mecânicas, estas são demonstradas pela resistência à tração por compressão diametral e pelo módulo de resiliência. A análise da vida útil, por sua vez, está relacionada com os dados obtidos através do programa SisPav, apresentados nos resultados de deflexão, tensão de tração e tensão de deformação.

#### **4.4 Resultados volumétricos**

Segundo o Asphalt Institute apud ANTT (2014), para se obter um indicativo do desempenho provável que as misturas apresentarão posteriormente em campo é necessária a verificação dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas compactadas em laboratório. Deste modo, seguir são apresentados os resultados obtidos para os principais parâmetros volumétricos das misturas asfálticas: densidade aparente, grau de compactação e volume de vazios.

O comparativo será entre os resultados obtidos no projeto atual de mistura asfáltica com os resultados buscados no estudo Lehnert (2015), para a mistura Flexpave. Para cada parâmetro em questão dois métodos serão utilizados para busca de resultados. O primeiro utilizando o método de cálculo empregado no Brasil, pela NBR 12891 (1993) e pelo DNER 117 (1994). O segundo utilizando o método de cálculo regido pela ASTM D 2726.

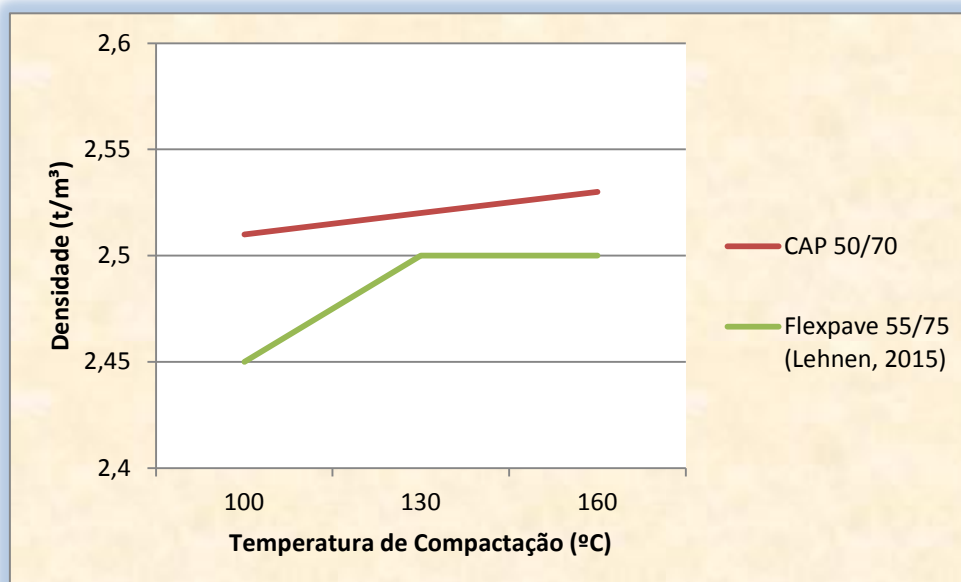
A verificação inicial refere-se à densidade aparente das misturas asfálticas. A Tabela 2 e o Gráfico 7 apresentam os resultados obtidos. Percebe-se que há um aumento na densidade aparente em relação à temperatura de compactação das misturas asfálticas. Quando maior a temperatura de compactação, maior a densidade aparente. Porém, percebe-se que a densidade aumenta consideravelmente nas misturas compactadas em 100°C e 130°C, as quais estão mais próximas da temperatura ideal de compactação.

Tabela 2 – Densidade aparente – DNIT

Ligante	Temperatura (°C)	Densidade (g/cm³)
CAP 50/70	100	2,515
	130	2,529
	160	2,53
Flexpave 55/75	100	2,45
	130	2,50
	160	2,50

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 7 – Densidade x Temperatura – DNIT



Fonte: Do Autor (2016)



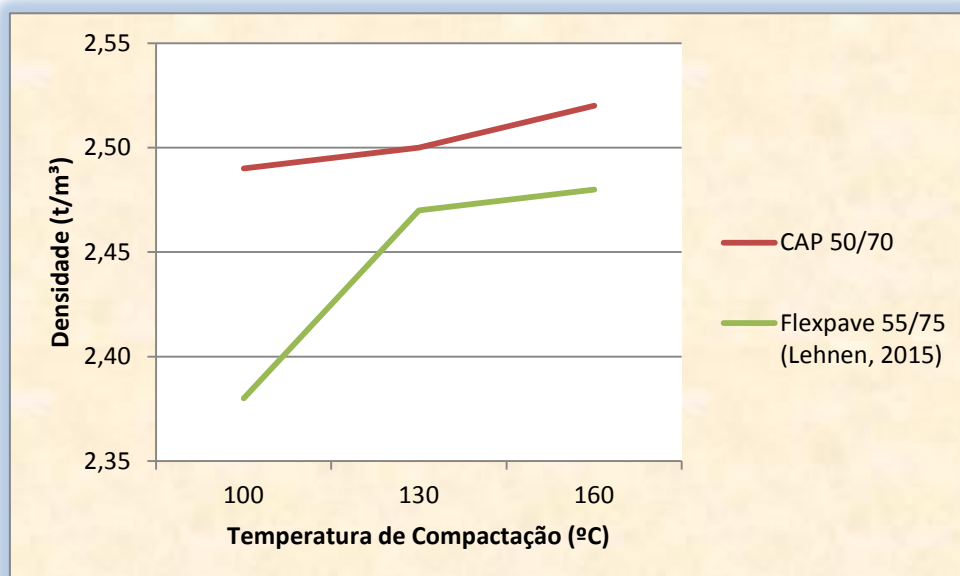
Enquanto isso, a Tabela 3 e o Gráfico 8 indicam os valores encontrados com a utilização do método de cálculo regido pela ASTM D 2726. Com este método, para as duas misturas foram encontrados valores levemente inferiores. O aumento da densidade se repetiu com a temperatura em elevação.

Tabela 3 – Densidade x Temperatura – ASTM

Ligante	Temperatura (°C)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CAP 50/70	100	2,49
	130	2,50
	160	2,52
Flexpave 55/75	100	2,38
	130	2,47
	160	2,48

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 8 – Densidade x Temperatura – ASTM



Fonte: Do Autor (2016)

Com os dois métodos utilizados podemos verificar que as densidades encontradas na mistura asfáltica CAP 50/70 encontram-se acima das densidades encontradas para o Flexpave 55/75.

Na sequência, a Tabela 4 e o Gráfico 9 indicam os resultados obtidos para o grau de compactação das misturas asfálticas em função da temperatura de compactação. Como realizado para a análise da densidade, o grau de compactação também obteve resultados através dos dois métodos, DNER e ASTM.

Inicialmente, com a densidade encontrada com o método da NBR, observa-se que para as misturas asfálticas com CAP 50/70 todos os valores de grau de compactação encontram-se dentro do limite permitido pela especificação vigente, entre 97% e 100%. Já para o Flexpave 55/75, somente o CP moldado em 100°C respeitou este limite. Nas outras duas temperaturas, os valores ficaram acima de 100%, portanto acima do limite máximo.

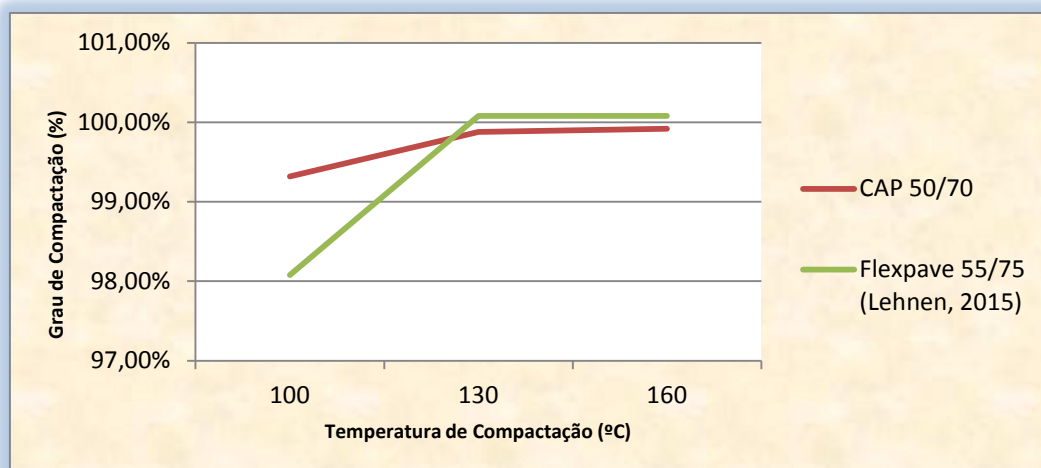
Com auxílio do gráfico, pode-se verificar que os valores do grau de compactação aumentam em função da temperatura. Também, que o aumento da temperatura influencia ainda mais na mistura asfáltica Flexpave 55/75. Para o CAP, o aumento ocorreu mas foi mais homogêneo.

Tabela 4 – Grau de compactação x Temperatura – DNIT

<b>Ligante</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Grau de Compactação (%)</b>
CAP 50/70	100	99,32%
	130	99,88%
	160	99,92%
Flexpave 55/75	100	98,08%
	130	100,08%
	160	100,08%

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 9 – Grau de compactação x Temperatura – DNIT



Fonte: Do Autor (2016)

Já nos resultados obtidos através do método ASTM para determinação da densidade aparente, encontrou-se resultados que se enquadram em sua grande maioria dentro dos limites estabelecidos pela especificação vigente.

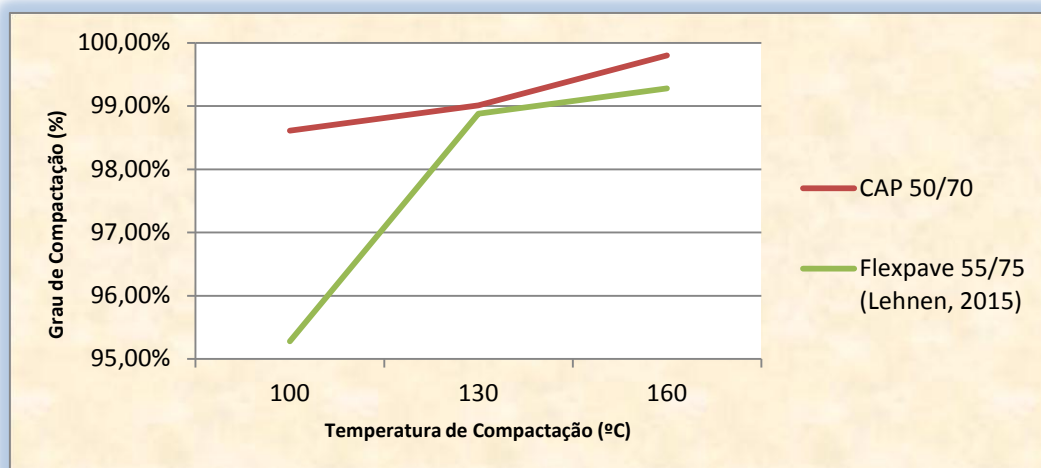
De acordo com a Tabela 5 e o Gráfico 10, é possível verificar que a única mistura asfáltica que apresenta grau de compactação inferior ao limite mínimo de 97% é a mistura com Flexpave 55/75 compactada à 100°C. Tratando-se das misturas com CAP 50/70 novamente todas encontram-se dentro dos limites exigidos. Mais uma vez, pode-se verificar que a diferença do grau de compactação conforme a temperatura é muito menor para os CPs moldados com a mistura CAP 50/70.

Tabela 5 – Grau de compactação x Temperatura – ASTM

Ligante	Temperatura (°C)	Grau de Compactação (%)
CAP 50/70	100	98,61%
	130	99,01%
	160	99,80%
Flexpave 55/75	100	95,28%
	130	98,88%
	160	99,28%

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 10 – Grau de compactação x Temperatura – ASTM



Fonte: Do Autor (2016)

Como terceira análise das propriedades volumétricas das misturas asfálticas, tem-se os resultados do volume de vazios em função da temperatura de compactação. Seguindo a mesma prática até o momento utilizada, foram calculados resultados através dos dois métodos, DNER e ASTM.

Analisando o método da NBR 16273 (2014), através da Tabela 6 e do Gráfico 11, pode-se constatar, de um modo geral, que ambas misturas asfálticas apresentam uma diminuição em seus volumes de vazios à medida em que a temperatura de compactação é aumentada, todavia nota-se que há uma oscilação entre as misturas com Flexpave 55/75 compactadas em 100°C e 130°C. Também se constata que nesta faixa de temperatura o volume de vazios das misturas com CAP 50/70 são mais homogêneos em relação às misturas com Flexpave 55/75.

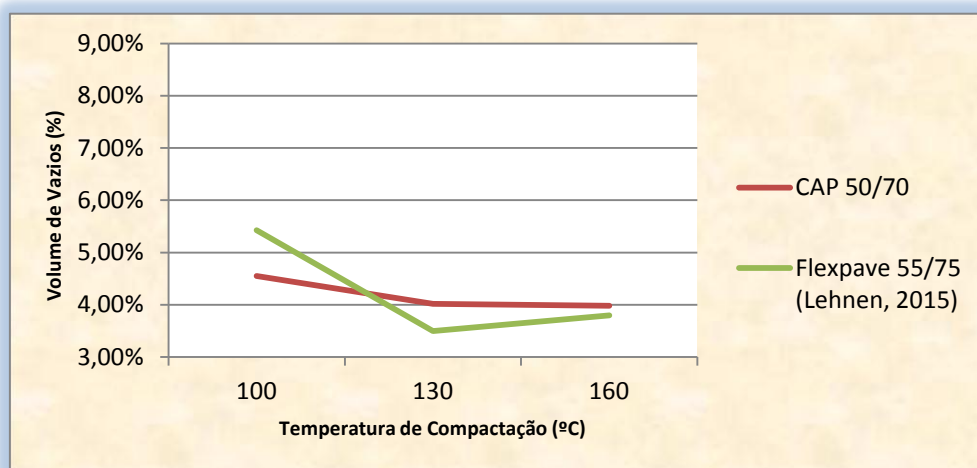
Tratando-se dos limites mínimos delimitados pela especificação DNIT 031 (2006), observa-se que as misturas com CAP 50/70 estão com Vv praticamente dentro dos limites exigidos, que é de 3% para camada de rolamento e 4% para camada de ligação (*binder*). O único CP que não atingiu este limite foi moldado à 160°C e obteve Vv de 3,98%, levemente abaixo do limite de 4% para camada de ligação.

Tabela 6 – Volume de vazios x Temperatura – DNIT

Ligante	Temperatura (°C)	Volume de Vazios (%)	Limites Camada de rolamento	Limites Camada de ligação
CAP 50/70	100	4,55	3 – 5 %	4 – 6 %
	130	4,02		
	160	3,98		
Flexpave 55/75	100	5,43		
	130	3,50		
	160	3,80		

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 11 – Volume de vazios x Temperatura – DNIT



Fonte: Do Autor (2016)

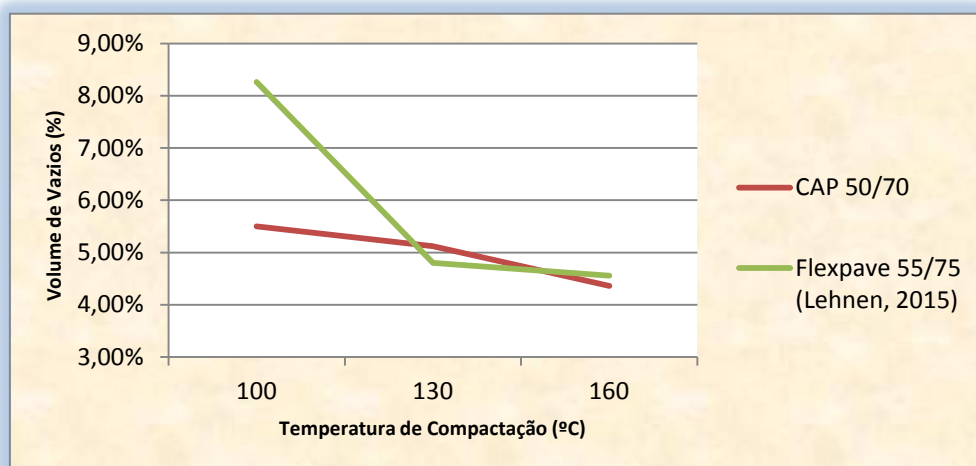
Já nos resultados obtidos seguindo o método do *Asphalt Institute* apud ANTT (2014), conclui-se a partir da apresentação da Tabela 7 e do Gráfico 12 que o volume de vazios novamente apresenta uma diminuição em seus valores com o aumento da temperatura. As misturas com CAP 50/70 não apresentam volume de vazios abaixo dos 4% necessários para a camada de ligação (*binder*). Já os CPs moldados à 100°C e 130°C apresentam valores levemente superiores ao limite de 5% para a camada de rolamento. Já as misturas com Flexpave 55/75 compactadas à 100°C apresentam valores acima dos limites estabelecidos pelo DNIT 031 (2006), tanto para a camada de rolamento (5%) como também para a camada de ligação (*binder*) (6%).

Tabela 7 – Volume de vazios x Temperatura - ASTM

Ligante	Temperatura (°C)	Volume de Vazios (%)	Limites Camada de rolamento	Limites Camada de ligação
CAP 50/70	100	5,50%	3 – 5 %	4 – 6 %
	130	5,12%		
	160	4,36%		
Flexpave 55/75	100	8,26%		
	130	4,80%		
	160	4,56%		

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 12 – Volume de vazios x Temperatura – ASTM



Fonte: Do Autor (2016)

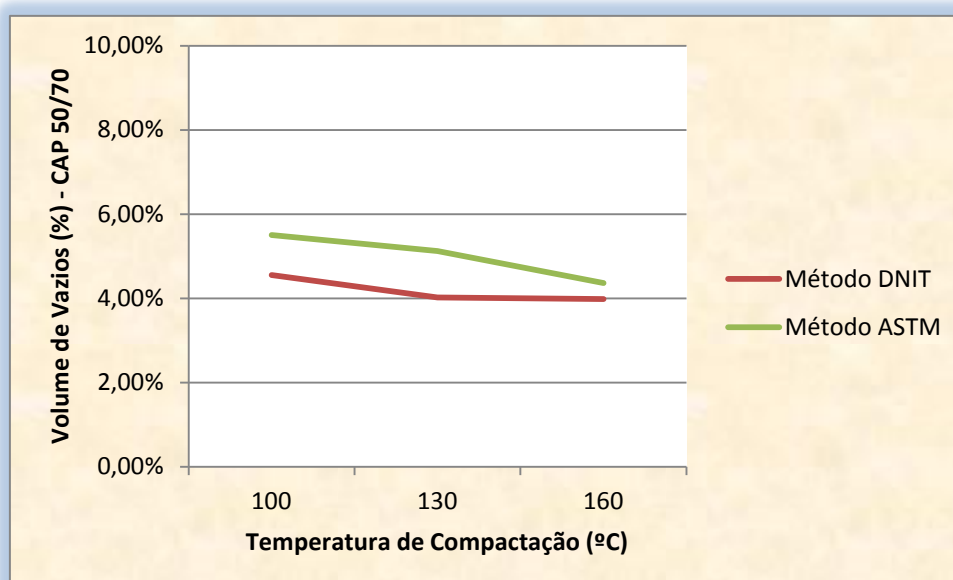
Em um comparativo entre os dois métodos de cálculo, DNER e ASTM, pode-se perceber que ambos mostram uma diminuição dos valores de Vv em função de uma maior temperatura. Conforme pode ser visto através da Tabela 8 e Gráfico 13 que apresentam o comparativo do Vv das misturas com CAP 50/70 e da Tabela 9 e Gráfico 14, os quais por sua vez apresentam o comparativo do Vv das misturas com Flexpave 55/75.

Tabela 8 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70

Método	Temperatura (°C)	Volume de Vazios (%)
DNIT	100	4,55%
	130	4,02%
	160	3,98%
ASTM	100	5,50%
	130	5,12%
	160	4,36%

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 13 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com CAP 50/70



Fonte: Do Autor (2016)

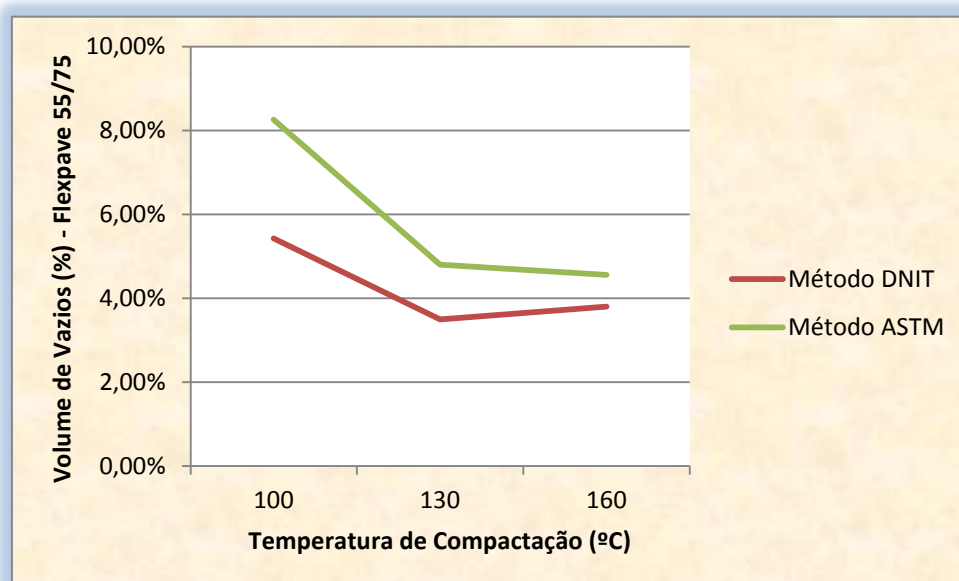
Em se tratando da mistura Flexpave 55/75, pode-se verificar uma leve oscilação no método DNER, com aumento do Vv entre 130°C e 160°C. Tal situação não ocorre com o método ASTM, onde o Vv continua sua curva descendente, o que torna este método mais coerente, neste caso.

Tabela 9 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75

Método	Temperatura (°C)	Volume de Vazios (%)
DNIT	100	5,43%
	130	3,50%
	160	3,80%
ASTM	100	8,26%
	130	4,80%
	160	4,56%

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 14 – Comparativo de métodos para obtenção do volume de vazios de misturas asfálticas com Flexpave 55/75



Fonte: Do Autor (2016)

Em síntese, as misturas com CAP 50/70 se comparadas com as misturas com Flexpave 55/75, apresentam em todas as temperaturas simuladas densidade aparente maior. Já no grau de compactação esta comparação somente não se justifica quando verificado o método DNER, quando os valores encontrados para a mistura asfáltica Flexpave 55/75 moldada à 130°C e 160°C estão um pouco acima da mistura CAP 50/70.



Nos dois métodos, DNER e ASTM, o volume de vazios se mostrou em diminuição com o aumento da temperatura. Na mistura com CAP 50/70 a curva descendente se mostra muito mais proporcional que na mistura com Flexpave 55/75. Esta, mesmo sendo também descendente, apresenta uma oscilação muito maior entre as temperaturas 100°C e 130°C.

Estes resultados, comparados ao estudo de Lehnen (2015) se mostram mais coerentes, isto porque no presente estudo foi criado um novo projeto de mistura asfáltica, especial para CAP 50/70, enquanto em Lehnen (2015) utilizou-se o mesmo projeto originalmente criado para o ligante Flexpave 55/75. Com a análise das propriedades volumétricas apresentadas, pode-se concluir que existe uma relação direta entre elas, independente do ligante asfáltico utilizado, de modo que, quanto maior a densidade da mistura asfáltica, maior o grau de compactação e menor o seu volume de vazios.

#### **4.5 Resultados Mecânicos**

Após serem coletados os resultados volumétricos dos corpos de prova, realizou-se os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR).

Na Tabela 10 e no Gráfico 15 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Inicialmente pode-se verificar que a resistência à tração aumenta à medida que a temperatura de compactação se eleva. Percebe-se também que nas temperaturas de 100°C e 130°C, os corpos de prova moldados por mistura asfáltica CAP 50/70 apresentam-se mais resistentes à tração do que os moldados com a mistura asfáltica Flexpave 55/75. Isto se inverte com o corpo de prova moldado à 160°C, onde o CP com Flexpave 55/75 se mostra levemente superior no item resistência à tração correspondendo à Bernucci et al (2008) que relaciona o aumento da resistência à tração do pavimento como um dos benefícios provenientes da utilização dos asfaltos modificados por polímero.

Em todas as situações a resistência à tração se apresenta de acordo com as especificações do DNIT 031(2006), que é de no mínimo 0,65 MPa, tanto para a camada de ligação (*binder*) como também para a camada de rolamento.

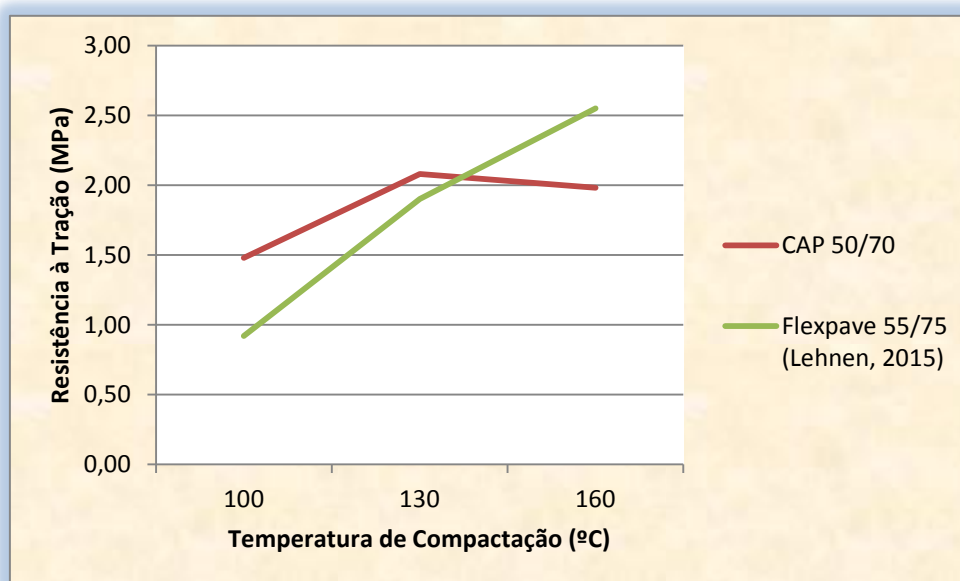
Mais uma vez, pode-se verificar que os resultados obtidos mostram oscilação muito maior para a mistura asfáltica Flexpave 55/75. Os valores de resistência à tração encontrados para o CAP 50/70, apesar de também terem uma elevação, foram mais homogêneos. Assim, pode-se afirmar, que como em outros ensaios, a temperatura de compactação de uma mistura asfáltica é fator determinante para a resistência à tração da mistura.

Tabela 10 – Resistência à tração X Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Resistência à tração (RT) (MPa)
CAP 50/70	100	1,48
	130	2,08
	160	1,98
Flexpave 55/75	100	0,92
	130	1,90
	160	2,55

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 15 – Resistência à tração X Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

O ensaio de módulo de resiliência apresentou valores que mostram-se semelhantes aos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração, podendo-se afirmar mais uma vez que o módulo de resiliência aumenta conforme a temperatura.

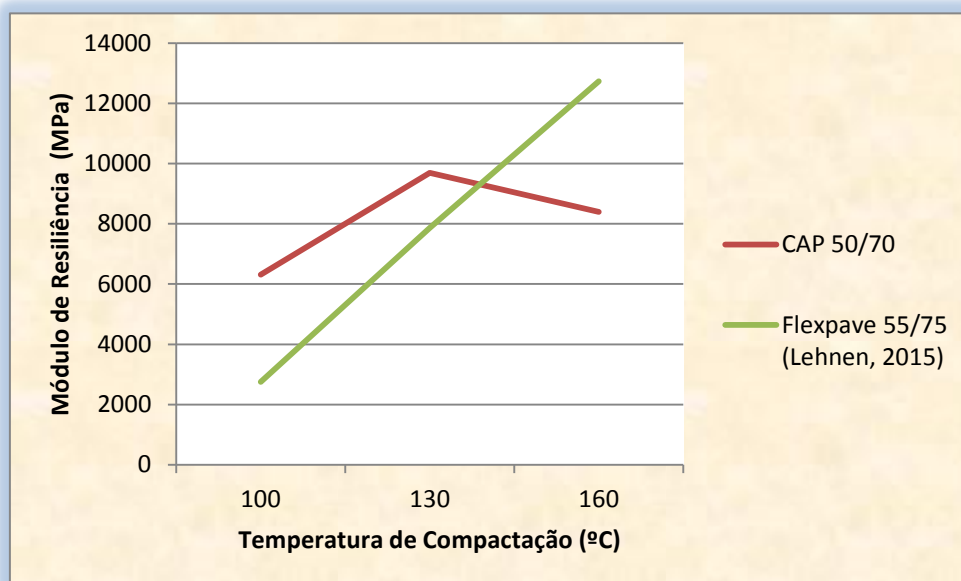
Examinando os resultados obtidos e apresentados na Tabela 11 e no Gráfico 16, pode-se verificar que os valores de MR para a mistura asfáltica CAP 50/70 aumentaram de 100°C para 130°C e sofreram uma pequena queda em 160°C, acompanhando o ocorrido no ensaio de resistência à tração. Já os valores encontrados para a mistura asfáltica Flexpave 55/75 tiveram todos aumento em relação à temperatura, mas novamente com grande oscilação, como por exemplo, para o CP moldado à 160°C, que obteve MR de 12727 MPa, o que Bernucci et al (2008), afirma não representar necessariamente a excelência de um pavimento. Ao contrário, um MR muito acima do normal evidencia uma mistura muito rígida, passível de danos que podem ser causados pela instabilidade do subleito. Esta instabilidade se associada a esta rigidez do revestimento, não permite que este atue de forma adequada pela ausência de flexibilidade, causando o seu rompimento, o qual pode ser ligeiramente percebido através do aparecimento de trincas.

Tabela 11 – Módulo de Resiliência X Temperatura

<b>Ligante</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Módulo de Resiliência (MR) (MPa)</b>
CAP 50/70	100	6309
	130	9694
	160	8395
Flexpave 55/75	100	2756
	130	7859
	160	12727

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 16 – Módulo de Resiliência X Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

A relação entre o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração também é um indicador importante e é apresentada pela Tabela 12 e Gráfico 17. A relação  $MR/RT$  é um parâmetro indicador do balanço adequado entre flexibilidade e resistência das misturas asfálticas, segundo Motta (2001). Já Magalhães (2004) indica que para um melhor comportamento mecânico da mistura asfáltica, deve-se ter uma menor relação  $MR/RT$ , obtendo-se assim uma combinação de flexibilidade e resistência à tração.

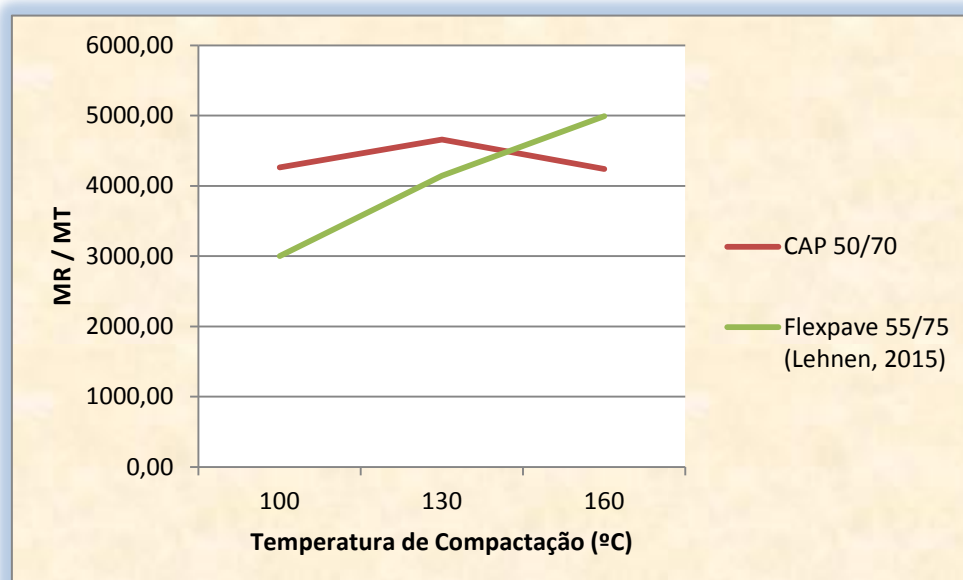
Como no presente estudo todos os resultados encontrados para os CPs com a mistura asfáltica CAP 50/70 seguiram a mesma tendência, a relação  $MR/RT$  mostrou-se muito próxima. Já diferente dos resultados encontrados com as misturas de Flexpave 55/75, que sempre oscilaram bastante, como verificado na tabela abaixo.

Tabela 12 – MR / MT x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	MR / MT
CAP 50/70	100	4262,84
	130	4660,58
	160	4239,90
Flexpave 55/75	100	2999,29
	130	4142,56
	160	4989,07

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 17 – MR / MT x Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

Na sequência estão apresentados os resultados das propriedades mecânicas das misturas asfálticas em estudo. Buscados através da simulação de dados oriundos do pavimento anterior no programa SisPav, apresenta-se a seguir os resultados de deflexão, tensão de tração e tensão de deformação. Estes resultados estão diretamente ligados ao módulo de resiliência encontrado para a mistura asfáltica.

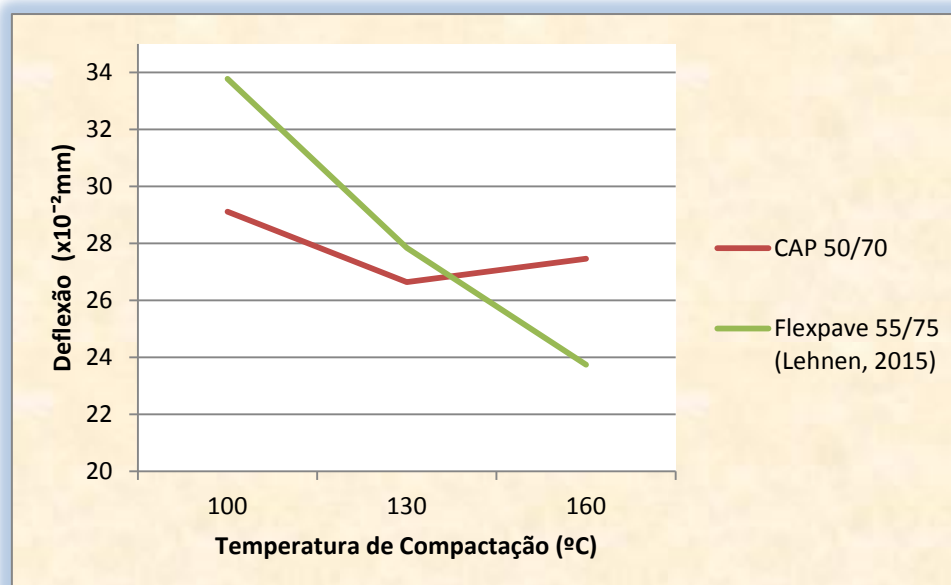
A deflexão diminui conforme a temperatura de compactação é elevada, por conta da rigidez adquirida pelo pavimento. Por se basear nos resultados do módulo de resiliência essa curva descendente só não se confirma para a mistura asfáltica CAP 50/70, na temperatura 160°C, onde pode-se verificar um pequeno aumento na deflexão. A Tabela 13 e o Gráfico 18 apresentam os resultados da deflexão. É importante salientar que a redução da deflexão é muito maior para a mistura asfáltica Flexpave 55/75.

Tabela 13 – Deflexão x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Deflexão ( $\times 10^{-2}$ mm)
CAP 50/70	100	29,11
	130	26,64
	160	27,46
Flexpave 55/75	100	33,77
	130	27,84
	160	23,74

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 18 – Deflexão x Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

Tratando-se da tensão de tração, a Tabela 14 e o Gráfico 19 mostram que conforme a temperatura de compactação, e conseqüentemente, o módulo de resiliência aumentam, a tensão de tração também aumenta, pois isto está diretamente ligado à rigidez do pavimento.

Mais uma vez, falando-se em CAP 50/70, pode-se visualizar um aumento da tensão de tração entre as temperaturas 100°C e 130°C, seguidos de um leve declínio na temperatura 160°C. Em um comparativo entre as duas misturas asfálticas, vemos que em relação ao Flexpave 55/75, a mistura CAP 50/70 tem valores maiores de tensão de tração nas temperaturas de compactação 100°C e 130°C. Já na temperatura 160°C a mistura asfáltica Flexpave 55/75 fica com resultado maior, continuando sua tendência de aumento, enquanto o CAP 50/70 sofre uma pequena queda.

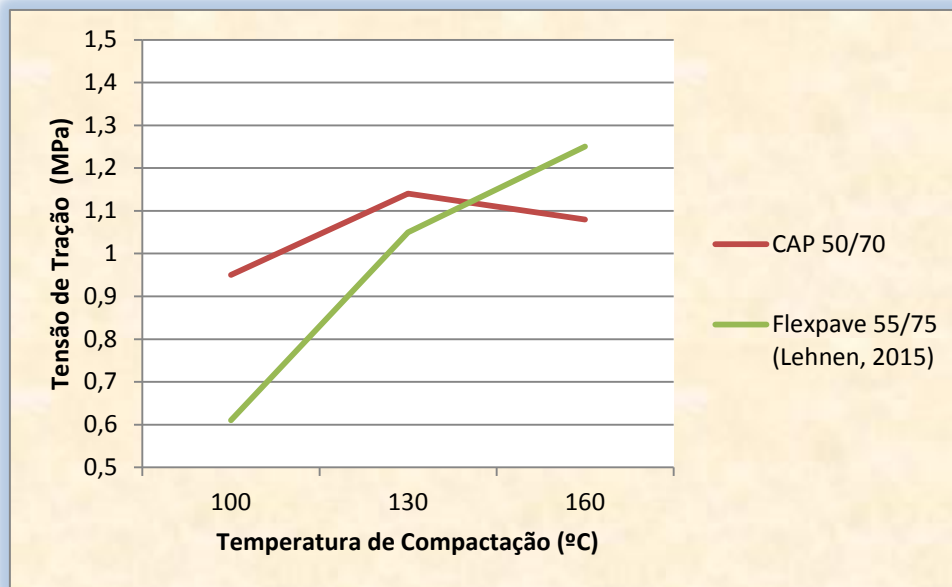
Importante também verificar que para o CAP 50/70, a diferença de tensão da temperatura, entre o menor e o maior ponto é de 20%. Já na mistura asfáltica Flexpave 55/75 essa diferença mostra um aumento de 105%. Teoricamente um pavimento mais rígido é mais resistente aos carregamentos, mas vale lembrar que ao ocorrer uma ruptura, esta se dará de forma acentuada.

Tabela 14 – Tensão de tração x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Tensão de tração (MPa)
CAP 50/70	100	0,95
	130	1,14
	160	1,08
Flexpave 55/75	100	0,61
	130	1,05
	160	1,25

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 19 – Tensão de tração x Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

A deformação de tração fica menor com o aumento da temperatura de compactação. Essa regra só não se confirma para a mistura asfáltica CAP 50/70, quando esta compactada à 160°C. Novamente, os valores de deformação de tração encontrados para as três diferentes temperaturas, se mostram muito mais próximos na mistura CAP 50/70 de que na mistura Flexpave 55/75. Para o CAP 50/70 temos valores entre 115,00μ e 89,00μ. Já para a mistura Flexpave 55/75 os valores giram em torno de 178,00μ e 74,00μ.

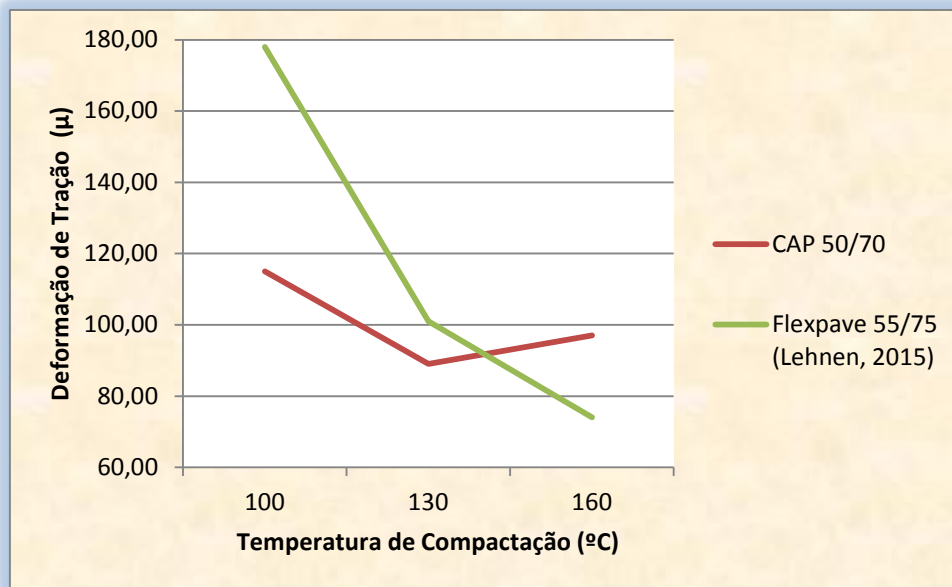
Tabela 15 – Deformação de tração x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Deformação de tração (μ)
CAP 50/70	100	115,00
	130	89,00
	160	97,00
Flexpave 55/75	100	178,00
	130	101,00
	160	74,00

Fonte: Do Autor (2016)



Gráfico 20 – Deformação de tração x Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

A equação de Pinto e Preusser (2002) traz a determinação da vida útil dos pavimentos. Também chamada de vida de fadiga dos pavimentos esta equação é calculada através da deformação de tração encontrada. Verifica-se na Tabela 16 o no Gráfico 21 que com o aumento da temperatura de compactação, a vida útil dos pavimentos também cresce. Esta relação confirma que uma maior temperatura, um maior módulo de resiliência e uma menor deformação, resultam em um crescimento da vida útil dos pavimentos.

Como esta equação esta diretamente ligada ao módulo de resiliência, nota-se que na mistura asfáltica CAP 50/70 temos um pequeno decréscimo na vida útil entre as temperaturas de 130°C e 160°C.

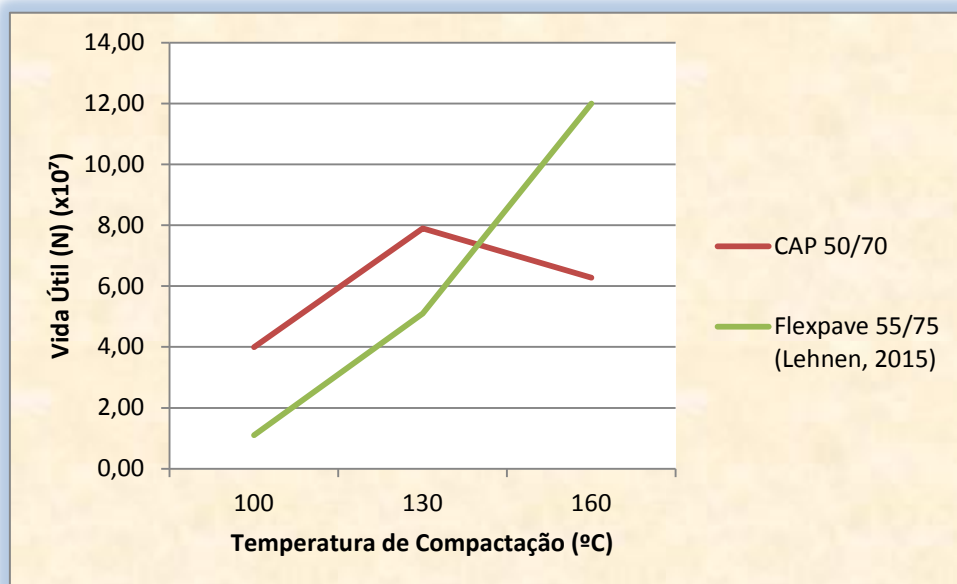
A diferença das misturas asfálticas, tratando-se de vida útil é muito grande. Enquanto na mistura asfáltica Flexpave 55/75 vemos um aumento de mais de 10 vezes, na mistura CAP 50/70 não temos um aumento de 2 vezes.

Tabela 16 – Vida Útil x Temperatura

Ligante	Temperatura (°C)	Vida Útil (N) (x10 <sup>7</sup> )
CAP 50/70	100	3,99
	130	7,89
	160	6,28
Flexpave 55/75	100	1,10
	130	5,10
	160	12,00

Fonte: Do Autor (2016)

Gráfico 21 – Vida Útil x Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

## 5 CONCLUSÕES

O estudo teve como objetivo verificar as propriedades mecânicas e volumétricas de duas misturas asfálticas compactadas em três diferentes temperaturas. Uma das misturas, o CAP 50/70, com um novo projeto confeccionado especialmente; outra, o Flexpave 55/75, buscado junto ao estudo de Lehnert (2015). O estudo possibilitou simular obras de pavimentação com compactação fora da temperatura ideal, analisando assim o impacto causado na vida útil do pavimento.

Com a confecção de um novo projeto para a mistura asfáltica CAP 50/70 foram realizados ensaios que geraram importantes resultados e análises, assim podendo-se chegar a uma série de conclusões. A seguir apresentam-se as conclusões obtidas:

- 1) A temperatura de compactação influencia as duas misturas asfálticas. Em uma comparação, sua incidência altera mais as propriedades da mistura Flexpave 55/75 do que o CAP 50/70;
- 2) As densidades foram calculadas através de dois métodos. Em ambos a densidade apresentou um aumento conforme ocorria a elevação da temperatura. Em uma comparação entre as misturas asfálticas, o CAP 50/70 exibiu valores maiores que o Flexpave 55/75. Através do método ASTM os resultados obtidos com a mistura CAP 50/70 apresentaram uma variação na densidade de 2,49 t/m<sup>3</sup> para 2,52 t/m<sup>3</sup>. Já na mistura Flexpave 55/75 a variação foi muito maior, iniciando em 2,38 t/m<sup>3</sup> para 2,48 t/m<sup>3</sup> no mesmo intervalo de temperatura. O método DNER indicou resultados com uma menor variação para as duas misturas asfálticas. Tratando-se das misturas com CAP 50/70, a densidade aparente alterou de 2,51 t/m<sup>3</sup> para 2,53

t/m<sup>3</sup> no intervalo de temperatura de 100°C e 160°C. Já nas misturas com Flexpave 55/75 o aumento foi de 2,45 t/m<sup>3</sup> para 2,50 t/m<sup>3</sup> no mesmo intervalo de temperatura;

3) O grau de compactação das misturas com CAP 50/70 foi maior utilizando o método ASTM, mesmo mostrando uma variação menor entre as temperaturas que o Flexpave 55/75. Já no método DNER, a mistura com CAP 50/70 só obteve resultado superior ao Flexpave 55/75 quando da compactação à 100°C. Nas outras duas temperaturas, 130°C e 160°C, a mistura Flexpave 55/75 teve um grau de compactação levemente superior;

4) Nos dois métodos utilizados, o volume de vazios apresentou uma diminuição em relação à temperatura de compactação, sempre com uma variação menor na mistura asfáltica CAP 50/70. No método DNER, por exemplo, a mistura CAP 50/70 apresentou uma variação no volume de vazios de 4,55% para 3,98%, para 100°C e 160°C. Para a mistura Flexpave 55/75 pode-se verificar uma variação muito maior, 5,443% para 3,80%, na mesma faixa de temperatura. A mesma ideia se confirmou no método ASTM, onde a mistura CAP 50/70 apresentou volume de vazios de 5,50% em 100°C e 4,36% em 160°C, mostrando uma variação bem menor que a mistura Flexpave 55/75, que apresentou 8,26% de Vv em 100° e 4,36% de Vv em 160°C;

5) Tratando-se da resistência à tração, as misturas com CAP 50/70 obtiveram resultados superiores ao Flexpave 55/75 em duas faixas de temperatura. Em 100°C, o CAP 50/70 apresentou RT de 1,48 MPa, contra 0,92 MPa de RT do Flexpave 55/75. Em 130°C, a mistura Flexpave 55/75 teve um crescimento considerável em sua resistência, chegando a 1,90 MPa, mesmo assim não superando 2,08 MPa do CAP 50/70. Na temperatura 160°C a mistura Flexpave 55/75 teve um aumento considerável em sua resistência à tração, chegando a 2,55 MPa, superando a resistência de 1,98 MPa obtida pelo CAP 50/70;

6) O módulo de resiliência apresentou resultados semelhantes aos resultados de resistência à tração, com valores maiores no CAP 50/70, nas duas primeiras faixas

de temperatura, 100°C e 130°C. Já em 160°C, a mistura asfáltica Flexpave 55/75 superou o CAP 50/70 chegando a um valor de 12.727,67 MPa, considerado um módulo muito elevado. A mistura Flexpave 55/75 novamente apresentou uma grande variação no MR em relação à temperatura de compactação. Para o CAP 50/70 nota-se uma oscilação entre as temperaturas 130°C e 160°C com uma queda no valor do módulo de resiliência de 9694 MPa para 8395 MPa;

7) Seguindo os resultados apresentados de resistência à tração e módulo de resiliência, a deflexão apresenta uma variação muito menor com CAP 50/70 do que com Flexpave 55/75. Para a mistura com CAP 50/70, na faixa de temperatura estudada, nota-se uma redução de menos de 10% na deflexão. Na mistura asfáltica Flexpave 55/75 a variação na deflexão chega aos 30%;

8) A tensão de tração se mostrou maior na mistura com CAP 50/70, em 100°C e 130°C. Em 100°C, a mistura CAP 50/70 obteve 0,95 MPa de tensão, contra 0,61 MPa do Flexpave 55/75. Em 130°C, o CAP 50/70 subiu sua tensão de tração para 1,14 MPa, enquanto o Flexpave 55/75, mesmo tendo valor menor, subiu para 1,05 MPa. Na última faixa de temperatura estudada, 160°C, a mistura com Flexpave 55/75 apresentou uma tensão de tração maior, com 1,25 MPa. Nesta mesma temperatura a mistura com CAP 50/70 teve declínio em sua tensão, ficando com 1,08 MPa;

9) A deformação de tração apresentou queda em seus valores em relação ao aumento da temperatura de compactação. Essa tendência não se confirmou para a mistura asfáltica CAP 50/70, quando esta compactada à 160°C. Novamente, a variação dos valores se mostrou menor para o CAP 50/70, onde tivemos valores entre 115,00μ e 89,00μ, que para o Flexpave 55/75, onde os valores giraram em torno de 178,00μ e 74,00μ.

10) A análise da vida útil confirmou a importância que a temperatura de compactação tem sobre ela. Para a mistura CAP 50/70 uma diferença de temperatura de compactação pode representar uma redução de até 35% na vida útil

do pavimento. Ainda maior pode ser a redução causada na vida útil de pavimentos com a mistura Flexpave 55/75, chegando a mais de 90%.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12891**: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall - Procedimento. Rio de Janeiro: ABTN, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16273**: Misturas asfálticas - Propriedades volumétricas de concreto asfáltico. Rio de Janeiro: ABTN, 2014.

Asphalt Institute (1989) **The Asphalt Handbook**, Manual Series No 4 1989 Edition.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ABEDA, 2008.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 035**: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Especificação de Material. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043**: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031 - ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136 - ME**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. IPR. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; et al **Estudo de misturas asfálticas mornas**. Estudo laboratorial das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas. Porto Alegre, 2007

CNT - Confederação Nacional do Transporte. Disponível em:  
<<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 23 out. 2015.

COELHO, W.; SÓRIA, M.H.A. **Variabilidade dos resultados do método Marshall**. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 11. 1992, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 1992.

DANIELESKI, Maria Luiza. **Proposta de metodologia de avaliação superficial de pavimentos urbanos**: aplicação à rede viária de Porto Alegre. 2004, 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em:  
<<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5789>>. Acesso em: 24 out. 2015.

DeSombre, R., Newcomb, D. E., Chadbourn, B., Voller., V. (1998). **Parameters to Define the Laboratory Compaction Temperature Range of Hot-Mix Asphalt**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat\\_view/28-doutorado/63-2007?start=15](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/28-doutorado/63-2007?start=15)>. Acesso em: 20 out. 2015.

FRANCKEN, L.; EUSTACCHIO, E.; ISACSSON, U.; PARTL, M.N. **Recent activities of RILEM TC 152 - PBM – performance of bituminous materials**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENT, 8., 1997, Seattle, USA.

FONSECA, Luiz Felipe da Silva da. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA**, 2ª etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:  
<[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat\\_view/1-mestrado/117-2013?start=30](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/1-mestrado/117-2013?start=30)>. Acesso em: 18 out. 2015.

GRECA ASFALTOS. Disponível em: < <http://www.grecaasfaltos.com.br/menu-esquerda-produtos-asfaltos-cap>>. Acesso em: 19 out. 2015.

LEHNEN, Gabriela. **Estudo sobre a compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, junho 2015.

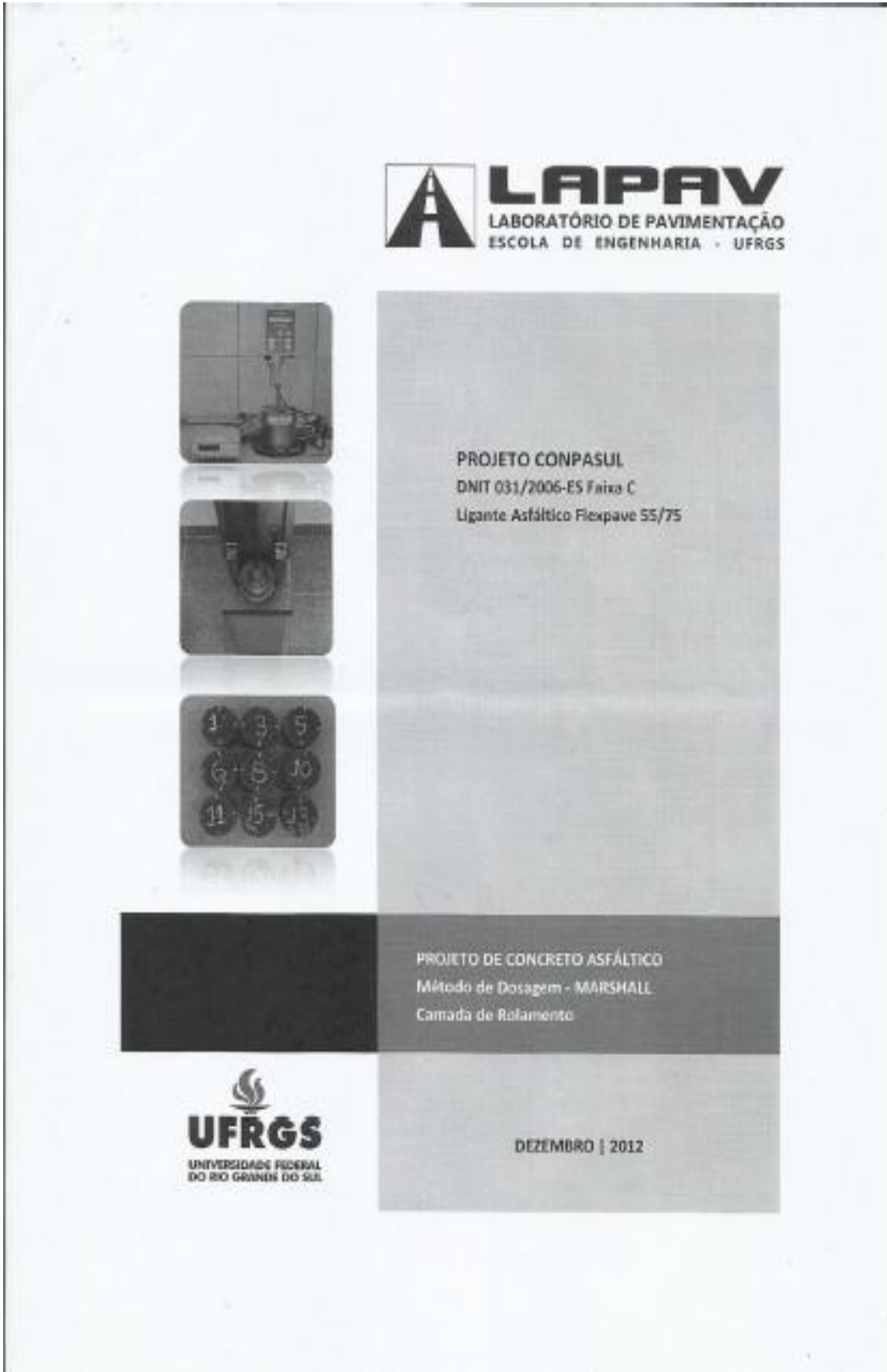
MOTTA, L.M.G. **Contribuição para a estimativa do módulo resiliente de misturas asfálticas**. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 14., 1998, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 1998.

SILVA, Paulo Fernando. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2008. v. 1.



SOARES, Jorge Barbosa; SILVEIRA, Márcio Albuquerque; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **O efeito da temperatura e do grau de compactação nas propriedades das misturas asfálticas**. 2001. Disponível em: <[www.antt.gov.br/html/objects/\\_downloadblob.php?cod\\_blob=3240](http://www.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=3240)>. Acesso em: 02 nov. 2015.

## **ANEXOS**

**Anexo I – Projeto da mistura asfáltica Flexpave 55/75**

The image shows the front cover of a technical report. At the top right is the LAPAV logo, which consists of a stylized 'A' inside a square, followed by the text 'LAPAV' in large bold letters, and 'LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO' and 'ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS' in smaller text below it. On the left side, there are three small square images stacked vertically: the top one shows a laboratory machine, the middle one shows a close-up of a component, and the bottom one shows a grid of nine circular samples labeled with numbers. The main body of the cover is divided into two horizontal sections. The top section is light gray and contains the text 'PROJETO CONPASUL', 'DNIT 031/2006-ES Faixa C', and 'Ligante Asfáltico Flexpave 55/75'. The bottom section is dark gray and contains the text 'PROJETO DE CONCRETO ASFÁLTICO', 'Método de Dosagem - MARSHALL', and 'Camada de Rolamento'. At the bottom left is the UFRGS logo, featuring a stylized flame above the text 'UFRGS' and 'UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL' below it. At the bottom right, in the dark gray section, is the date 'DEZEMBRO | 2012'.


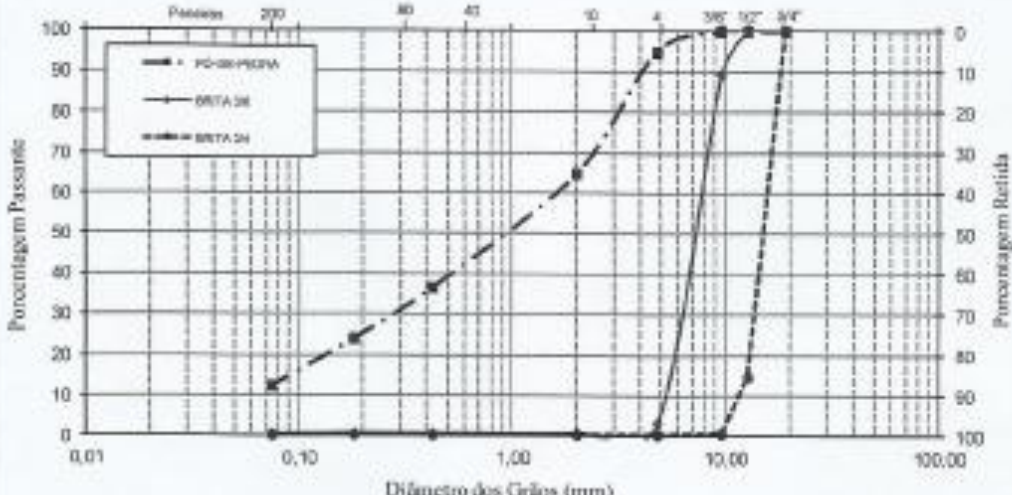
**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

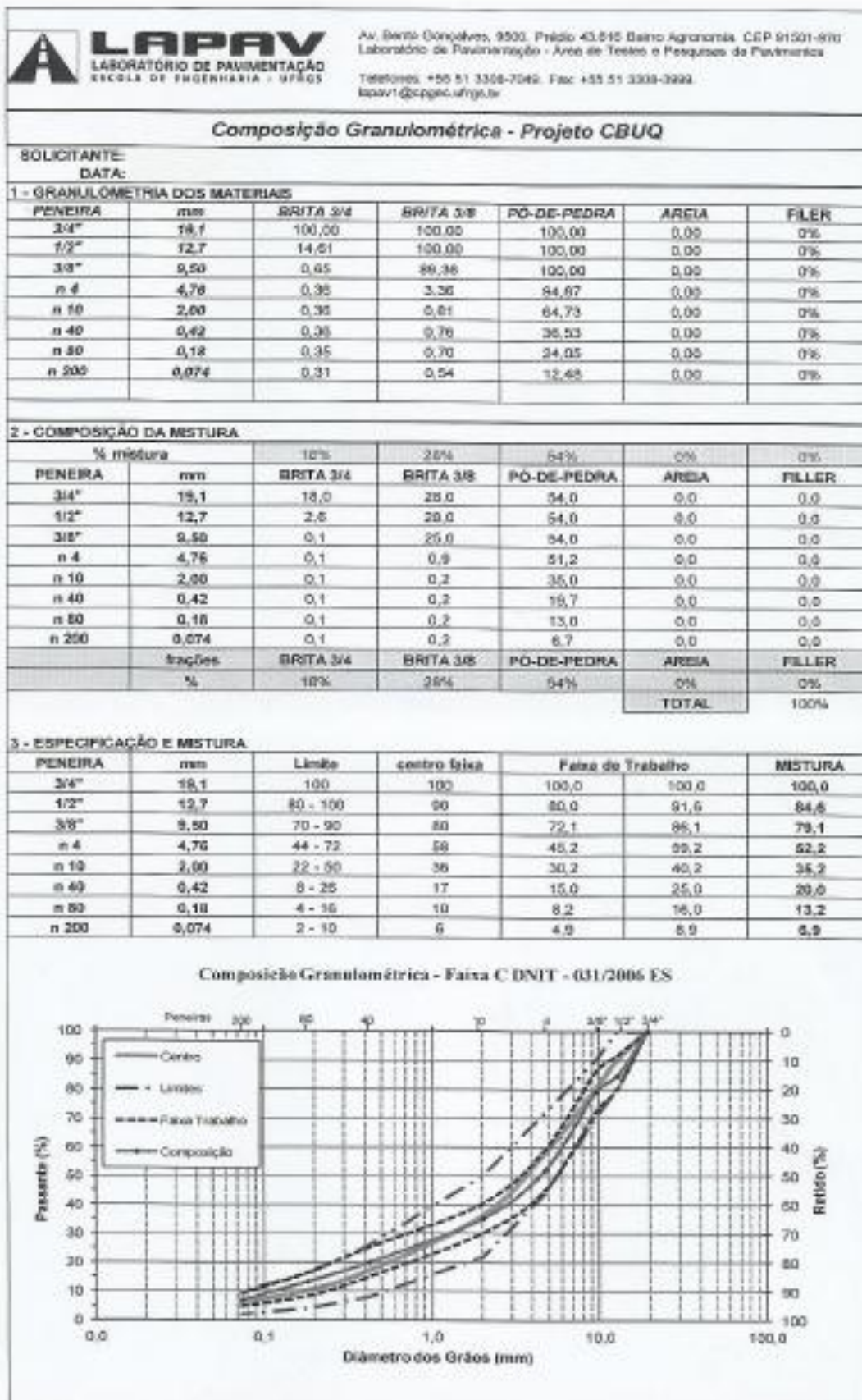
PROJETO CONPASUL  
DNIT 031/2006-ES Faixa C  
Ligante Asfáltico Flexpave 55/75

PROJETO DE CONCRETO ASFÁLTICO  
Método de Dosagem - MARSHALL  
Camada de Rolamento

**UFRGS**  
UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL

DEZEMBRO | 2012

 <b>LAPAV</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO ESCOLA DE ENGENHARIA - UFPA		Av. São Gonçalves, 5555 - Prédio 43.816 Bairro Agronomia - CEP 61501-970. Laboratório de Pavimentação - Área de Testes e Pesquisas de Pavimentos Telefones: +55 51 3308-7040. Fax: +55 51 3308-3222. lapav1@cpqec.ufpa.br				
<b>Caracterização dos Agregados</b>						
<b>1 - IDENTIFICAÇÃO</b>						
Projeto:	Concreto Asfáltico					
Operador:						
Data:						
Objetivo:	Projeto da mistura em concreto asfáltico					
Obs:	CAP 55/75 E					
<b>2. PROCEDÊNCIA DOS AGREGADOS MINERAIS</b>						
Material	Procedência					
BRITA 3/4						
BRITA 3/8						
PÓ-DE-PEDRA						
AREIA						
FILER						
<b>3 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</b>						
PENEIRA	mm	BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ-DE-PEDRA	AREIA	FILER
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00		
1/2"	12,70	100,00	100,00	100,00		
3/8"	9,50	0,65	88,36	100,00		
n 4	4,75	0,36	2,35	94,87		
n 10	2,00	0,36	0,81	84,73		
n 40	0,42	0,36	0,75	38,53		
n 80	0,18	0,35	0,70	24,06		
n 200	0,075	0,31	0,64	12,48		
Granulometria Material Pétreo						
						
<b>4. ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO GRAÚDO (DAER108/01)</b>						
Material	Valor obtido no ensaio (utilização de placa de lamelaridade)					
BRITA 3/4						
BRITA 3/8						







**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio 43.816  
Bairro Agronomia. CEP 91501-970.

Telefones:  
+55 51 3308-7049. Fax: +55 51 3308-3999.  
lapav1@cpgcc.ufrgs.br

### **Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall**

#### **1 - IDENTIFICAÇÃO**

Projeto: Concreto Asfáltico

Operador:

Ligante: CAP 55/75 E

Data:

Mistura:

Obs:

#### **2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL**

AGREGADOS						CAP	MISTURA MINERAL	
	% retida	D <sub>max</sub>	D <sub>ap</sub>	D <sub>efetiva</sub>	Absorção	Densidade	D <sub>real</sub>	2,954
3/4" - n° 10	64,75	2,954	2,824	2,889	1,550	0,999	D <sub>ap</sub>	2,868
pas n° 10	35,25	2,954					D <sub>efetiva</sub>	2,912

#### **3 - ESPECIFICAÇÕES**

Parâmetro	DNER	DAER - RS
Parâmetro	CAPA	CAPA
Parc. Vazios (%)	3 a 5	3 a 5
RBV (%)	75 a 82	75 a 82
Estabilidade (kgf)	>500	> 800
Fluência (1/100")	8 a 18	8 a 18
VAM para 3/4"	--	> 16

#### **4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO**

Mistura: 4 cps na cuba

Compactação: 75 golpes por face em compactador mecânico

#### **5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS**

Propriedade	Teor de Ligante (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Volume de Vazios (%)	6,4	5,1	3,5	2,5	2,1
Relação Betume Vazios (%)	61	68	78	85	88
Vazios do Agregado Mineral (%)	16,32	16,33	16,00	16,28	17,01
Massa Esp. Máx. Média (kN/m³)	2,639	2,619	2,583	2,569	2,542
Massa Esp. Aparente (kN/m³)	2,469	2,484	2,503	2,505	2,490
Estabilidade (kN)	1964	1976	1888	1423	1228
Fluência (mm)	13	14	17	18	25
Relação Est/Fluência (kN/mm)	157	173	208	160	163

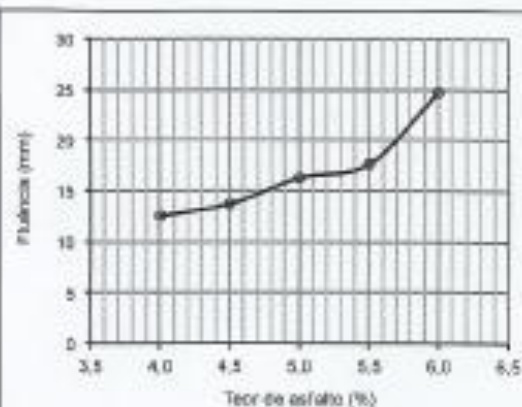
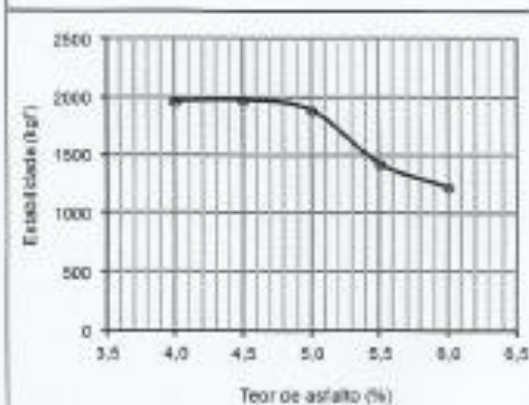
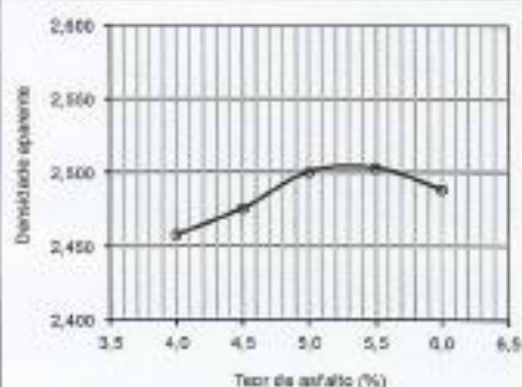
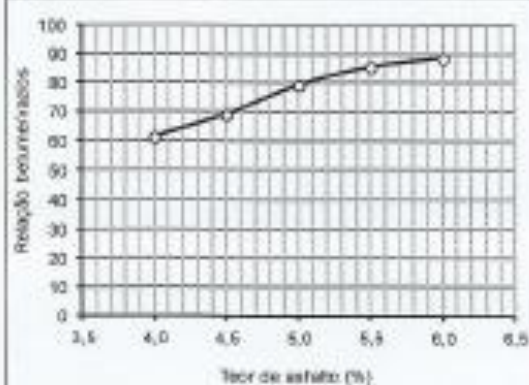
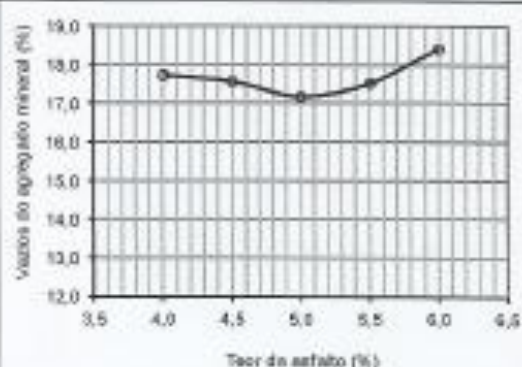
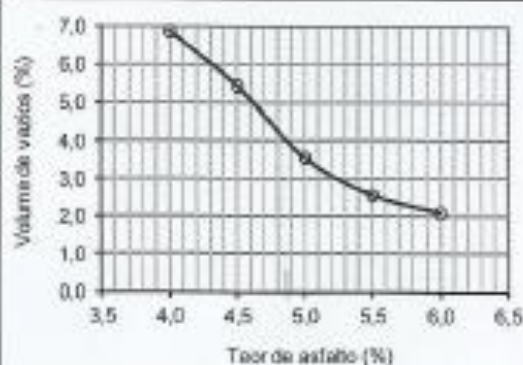


**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.816  
Bairro Agronomia, CEP 91501-070.

Telefones:  
+55 51 3308-7049, Fax: +55 51 3308-3999.  
lapav1@cpgec.ufrgs.br

## 6 - GRÁFICOS METODOLOGIA MARSHALL - MÉTODO NBR





**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.816  
Bairro Agronomia, CEP 91501-970.

Telefones:  
+55 51 3308-7049. Fax: +55 51 3308-3999.  
lapav1@cpgec.ufrgs.br

**7 - PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA - Definido Segundo Método da NBR 15.619-A**

<i>Propriedade</i>	<i>ESP 16/91 DAER</i>	<i>Valor de Projeto</i>
<i>Teor de Betume (%)</i>	—	4,90
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	78,00
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	> 16	17,20
<i>Massa Esp. Max. Medida (kN/m³)</i>	—	2,585
<i>Massa Esp. Aparente (kN/m³)</i>	—	2,458
<i>Estabilidade (kgf)</i>	> 800	1900
<i>Fluência (1/100 in)</i>	8 a 16	15,9
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	—	1,21
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	—	4540
<i>Relação Mr/Rt (adm)</i>	—	3752
<i>Relação Est/Fluência (kgf.m)</i>	—	119
<i>Relação Filler/Betume (%)</i>	0,6 a 1,6 (Superpave)	1,39

**Relação Filler/Betume**

% passante na 200	6,95
teor de ligante (%)	5,00
<i>R F/B</i>	1,39

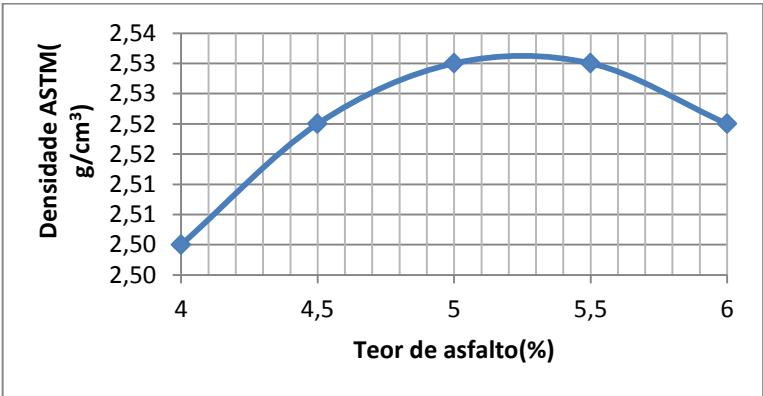
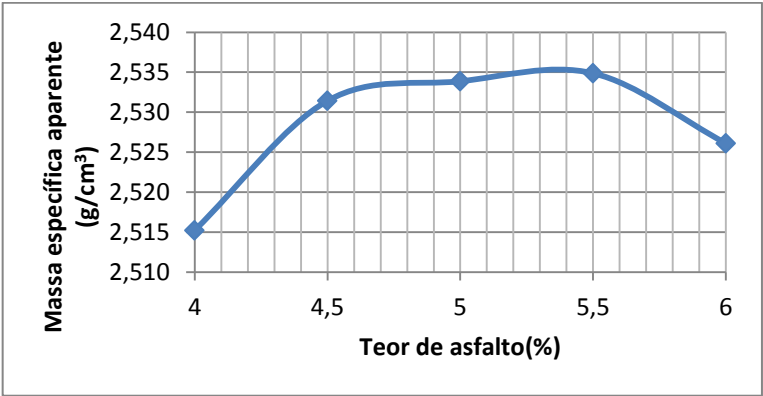


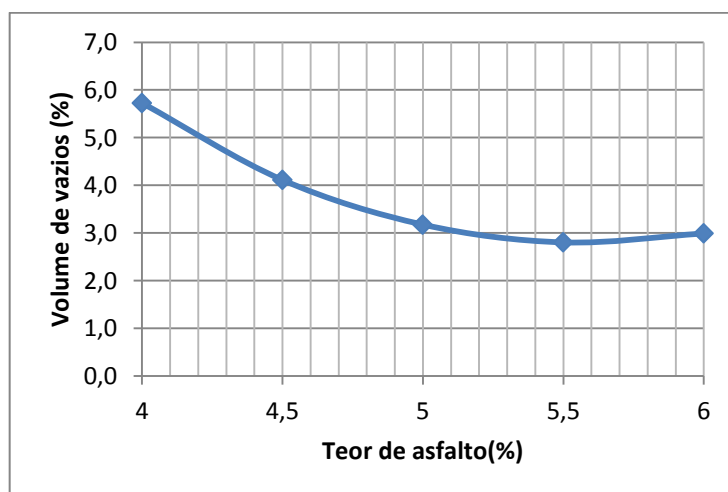
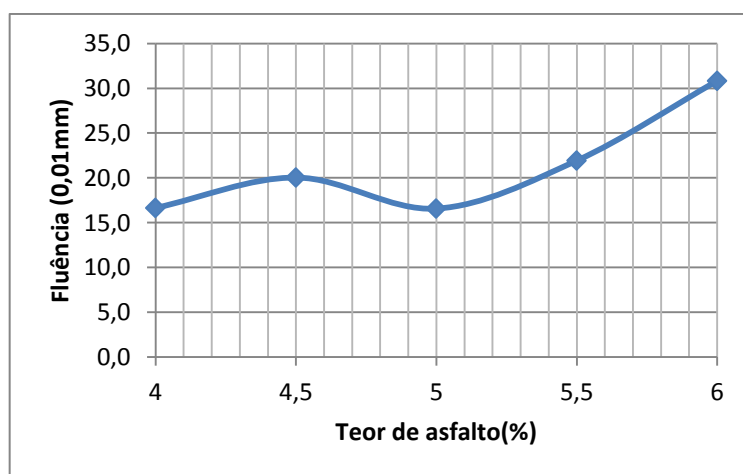
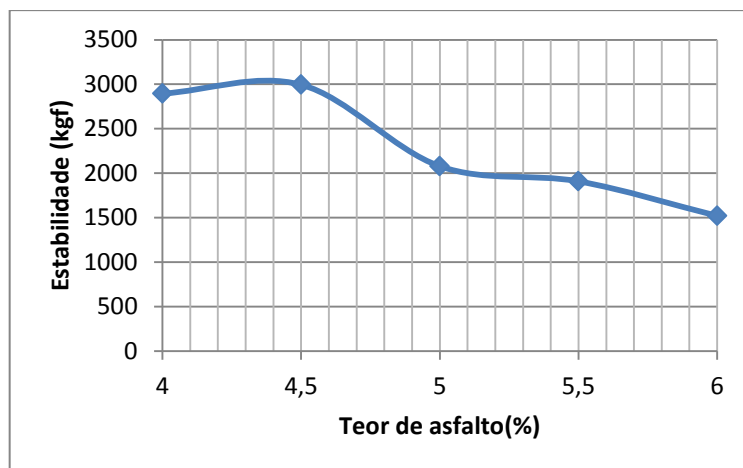
IMPRESSO PARA PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS - DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA ATRAVÉS DA - ABNT NBR 15.619-PROCEDIMENTO A																
Densidades e Porcentagens de agregados, Miúdo e Filler				Densidade agregado			Densidade da mistura dos agregados e ligante				Especificação/revisão		Data			
G1, G2(aparente)				grauído	miúdo	filler		Gsb(eq.1)	2.869			Tipo de ligante		CAP 55/70 E		
Gsb1r, Gsb2r e G3 (Reais)				---	---	---		Gsb	---			Energia		75 golpes por face		
% Graúdo(P1), Miúdo(P2), Filler(P3)				64,7	35,3	0,0		Gsb	0,999			Observação				
massa gramas				NBR 15.573	NBR 15.619	NBR 15.619		dens.	ASFALTO			%		%		
SSSeca				H2O	Dens ap.	Gmm		efetiva	% absorvido	% efetivo		Vários		VAM		
A, B, C, D				E	F	G		H	I	J		K		L		
---				D - C	0%	ensaios		Gsb(eq.2)	Pbs(eq.3)	Pbe = A - I		100 (G - F) / G		100 - [(F . 100 - A) / Gsb]		
4,0	1313,6	780,1	1317,0	536,9	2,446	2,639		---	---	---		---		---		
4,0	1314,7	783,8	1317,3	533,53	2,404			---	---	---		---		---		
4,0	1315,9	786,2	1320,6	534,36	2,462			---	---	---		---		---		
---	---	---	---	---	---			---	---	---		---		---		
4,5	1297,9	776,0	1299,7	523,73	2,478	2,618		2,832	-0,4	4,4	6,9	---		17,7		
4,5	1320,4	789,1	1323,0	533,92	2,473			---	---	---		---		---		
4,5	1260,7	752,1	1261,3	509,18	2,476			---	---	---		---		---		
---	---	---	---	média	2,458	2,639		---	---	---		---		---		
5,0	1295,6	778,2	1296,1	517,9	2,502	2,593		2,834	-0,4	4,9	5,4	---		17,6		
5,0	1304,6	781,2	1305,4	524,2	2,489			---	---	---		---		---		
5,0	1308,7	788,0	1309,2	521,3	2,511			---	---	---		---		---		
---	---	---	---	média	2,500	2,593		---	---	---		---		---		
5,5	1245,9	747,8	1246,2	498,4	2,500	2,569		2,831	0,4	5,4	3,6	---		17,2		
5,5	1302,4	783,3	1303,0	519,68	2,506			---	---	---		---		---		
5,5	1311,5	788,0	1311,9	523,9	2,503			---	---	---		---		---		
---	---	---	---	média	2,503	2,569		---	---	---		---		---		
6,0	1293,8	775,8	1294,0	518,2	2,497	2,542		2,828	-0,5	6,0	2,6	---		17,5		
6,0	1291,9	771,0	1292,1	521,14	2,479			---	---	---		---		---		
6,0	1305,4	781,6	1305,8	524,1	2,491			---	---	---		---		---		
---	---	---	---	média	2,489	2,542		---	---	---		---		---		
---	---	---	---	média	2,489	2,542		2,820	-0,6	6,6	2,1	---		18,4		
(eq. 1) Gsb =				(P1/G1) + (P2/G2)				(eq. 2) H = Gsb =				(eq. 3) I = Pbs =				
								100 - Pb				Gsb(Gsb - Gsb(100 - Pb))				

Anexo II – Projeto da mistura asfáltica CAP 50/70

PROJETO DE MISTURA MARSHALL

ENSAIO MARSHALL	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS							
	Teor Asfalto (%)		Dens g/cm <sup>3</sup>	Est kgf	f 0,01"	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)
DADOS DO ENSAIO	4,00	2,50	2,515	2895	16,7	5,7	63,73	15,79
	4,50	2,52	2,531	2995	20,0	4,1	73,47	15,50
	5,00	2,53	2,534	2079	16,6	3,2	79,95	15,85
	5,50	2,53	2,535	1909	21,9	2,8	83,25	16,75
	6,00	2,52	2,526	1521	30,8	3,0	83,52	18,15
%ótimo	4,60	2,525	2,532	2800	19,0	4,0	77,0	15,50
Limite Superior				-	16,0	5,0	82,0	-
Limite Inferior				min 500	8,0	3,0	75,0	min 14







**ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO 25°C**

Solicitante:	Lucas Eduardo Grave e Prof. João Rodrigo Guerreiro Mattos
Procedência:	UNIVATES
Data:	02/06/2016
Operador:	Daniel

**Observações:**

MR e RT em MPa  
Altura e Diâmetro em cm.

C.P	Diâm.	Altura	MR <sub>1</sub>	MR <sub>2</sub>	MR <sub>3</sub>	MR	Leitura	RT
1	10,10	6,89					787	1,45
2	10,10	6,79	5987	5943	5961	5964	757	1,41
3	10,10	6,75	6674	6667	6622	6654	840	1,57
					Média	6309		1,48
					Desvio	488		0,09
					CV	7,74		5,85
4	10,10	6,65					1261	2,40
5	10,10	6,68	10372	10390	10513	10425	1190	2,25
6	10,10	6,87	9147	8933	8811	8964	854	1,57
					Média	9694		2,08
					Desvio	1033		0,44
					CV	10,66		21,26
7	10,10	6,64					1088	2,07
8	10,10	6,66	8657	8600	8628	8628	1043	1,98
9	10,10	6,63	8145	8160	8178	8161	985	1,88
					Média	8395		1,98
					Desvio	330		0,10
					CV	3,94		4,89

Av Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar  
CEP 90035-190 - POA - RS - BRASIL  
E-mail: lapav1@cpgec.ufrgs.br

Fone: +55 51 3308 3462  
Fax: +55 51 3308 3999